



Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Ежемесячный журнал

1'2020

Учредитель:

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет „ЛЭТИ“
им. В. И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)
197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
Тел.: (812) 346-44-87
Факс.: (812) 346-27-58

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС2-8390
от 04.12.2006 г. выдано
Управлением Федеральной
службы по надзору
за соблюдением
законодательства в сфере
массовых коммуникаций
и охране культурного наследия
по Северо-Западному
федеральному округу

Редакционный совет:

Кутузов В. М., д-р техн. наук, профессор – председатель
Гайворонский Д. В.,
канд. техн. наук, доцент – заместитель председателя
Соломонов А. В.,
д-р физ.-мат. наук, профессор – главный редактор
Кострин Д. К.,
канд. техн. наук, доцент – ответственный секретарь

Аббакумов К. Е., д-р техн. наук, профессор
Алексеев В. В., д-р техн. наук, профессор
Белов М. П., д-р техн. наук, профессор
Вендик О. Г., д-р техн. наук, профессор
Герасимов И. В., д-р техн. наук, профессор
Гусаров В. В., д-р хим. наук, чл.-кор. РАН
Зубков В. И., д-р физ.-мат. наук, профессор
Имаев Д. Х., д-р техн. наук, профессор
Корляков А. В., д-р техн. наук, профессор
Куприянов М. С., д-р техн. наук, профессор
Лысенко Н. В., д-р техн. наук, профессор
Молдовян Н. А., д-р техн. наук, профессор
Пронин М. В., д-р техн. наук, профессор
Путов В. В., д-р техн. наук, профессор
Советов Б. Я., д-р техн. наук, профессор
Степанов О. А., д-р техн. наук, профессор
Ухов А. А., д-р техн. наук, профессор
Фахми Ш. С., д-р техн. наук, профессор
Филатов Ю. В., д-р техн. наук, профессор
Шестопалов М. Ю., д-р техн. наук, профессор
Юлдашев З. М., д-р техн. наук, профессор

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС
ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ
«ПРЕССА РОССИИ». ТОМ 1
«ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ» 45821**

Подписка производится
в любом почтовом отделении России

*Журнал включен в Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени
кандидата наук, на соискание ученой
степени доктора наук, в соответствии
с требованиями приказа Минобрнауки
России от 25 июля 2014 г. № 793*

Редакция:

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Тел.: (812) 234-02-23
E-mail: izvestiya-leti@yandex.ru
www.izv.eltech.ru



Izvestiya SPbGETU «LETI»

Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal

1'2020

Monthly journal

Editorial Board of the Journal:

Kutuzov V. M., D. Sc. in Engineering, Prof. – chairman

Gaivoronskii D. V.,

Ph. D. in Engineering, Associate Prof. – deputy chairman

Solomonov A. V.,

D. Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Prof. – editor in chief

Kostrin D. K.,

Ph. D. in Engineering, Associate Prof. – executive secretary

Abbakumov K. E., D. Sc. in Engineering, Prof.

Alekseev V. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Belov M. P., D. Sc. in Engineering, Prof.

Vendik O. G., D. Sc. in Engineering, Prof.

Gerasimov I. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Gusarov V. V., D. Sc. in Chemistry, Corresponding Member
of Russian Academy of Sciences

Zubkov V. I., D. Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Prof.

Imaev D. H., D. Sc. in Engineering, Prof.

Korlyakov A. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Kuprianov M. S., D. Sc. in Engineering, Prof.

Lysenko N. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Moldovyan N. A., D. Sc. in Engineering, Prof.

Pronin M. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Putov V. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Sovetov B. Ya., D. Sc. in Engineering, Prof.

Stepanov O. A., D. Sc. in Engineering, Prof.

Uhov A. A., D. Sc. in Engineering, Prof.

Fahmi S. S., D. Sc. in Engineering, Prof.

Filatov Yu. V., D. Sc. in Engineering, Prof.

Shestopalov M. Yu., D. Sc. in Engineering, Prof.

Yuldashev Z. M., D. Sc. in Engineering, Prof.

Founder:

Saint Petersburg Electrotechnical
University (ETU)

Journal is registered
in Federal Service for Media Law
Compliance and Cultural Heritage
in the North-West Federal Region
(ПИ № ФС2 – 8390 of 04.12.2006)

*On the resolution of the Higher Attestation Committee
under the Russian Federation Ministry of Education
the Journal is included in the «List of Periodical
and Scientific and Technical Publications Issued
in the Russian Federation where the Doctoral
Theses Key Results shall be published*

Содержание

ФИЗИКА

Хмельницкий И. К., Айвазян В. М., Алексеев Н. И., Бройко А. П., Калёнов В. Е., Тестов Д. О. Получение и исследование пленок PEDOT в качестве электродов ионных электроактивных актюаторов.....	5
Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж., Базарова С. Б. Акустоэлектрический метод определения диэлектрических характеристик жидкости в граничном слое.....	11
Вагин А. В., Инюкина А. М. Уменьшение коэффициента отражения звуковой волны от слоистой среды при нормальном падении	16

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Куракина Н. И., Михайлова А. А. Картографическое моделирование снежного покрова в технологии геоинформационных систем	23
Гурин А. В., Пазников А. А. Реализация в модели акторов децентрализованной атомарной рассылки без процедуры выбора лидера	28
Мельник В. С. Многопоточная маршрутизация в автоматизированной системе учета конечных нод распределенного кластера	38
Герасимов И. В., Кузьмин С. А., Сафьянников Н. М., Рудинский А. В. Сложнофункциональные блоки вычислительной перцепции в классе вычислительно-преобразовательных цепей	43
Назаренко Н. А., Падерно П. И. Оценка логической сложности и стереотипности циклических структур в алгоритмах деятельности оператора.....	52
Пантелеев М. Г., Салимов А. Ф. Анализ алгоритмов навигации интеллектуального агента в виртуальном футболе	60

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Белов М. П., Чыонг Д. Д., Лань Н. В. Разработка математической модели и управление методом разделения закона управления для экзоскелета.....	71
Татаринцев Н. И., Карасев Д. С. Применение энергосберегающего режима в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе	77
Нтавухоракомейе Н., Ндайрагиже Л. Проектирование и разработка экономически эффективного контроллера заряда автономной солнечной электростанции	82

Сведения об авторах	89
---------------------------	----

Правила представления рукописей авторами	93
--	----

Редактор
Н. В. Лукина
Комп. верстка
И. С. Беляевой

Подписано в печать 27.01.20.
Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура «Times New Roman».
Уч.-изд. л. 12,22. Печ. л. 11,75.
Тираж 300 экз. (1-й завод 1–120 экз.)
Заказ 2.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
Тел. / факс: (812) 346-28-56

Contents

PHYSICS

<i>Khmelnitsky I. K., Ayvazyan V. M., Alekseev N. I., Broyko A. P., Kalyonov V. E., Testov D. O.</i> Preparation and investigation of PEDOT films as electrodes of ionic electroactive actuators.....	5
<i>Simakov I. G., Gulgenov Ch. Zh., Bazarova S. B.</i> Acoustoelectric method for determining the dielectric characteristics of a fluid in the boundary layer.....	11
<i>Vagin A. V., Inyukina A. M.</i> Decrease in the reflection coefficient of a sound wave from a layered medium during normal incidence.....	16

INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGIES AND CONTROL

<i>Kurakina N. I., Mikhaylova A. A.</i> Cartographic modelling of snow cover in geographic information system technology	23
<i>Gurin A. V., Paznikov A. A.</i> Algorithm for choosing local neighbourhoods of decentralized schedulers in geographically distributed computer systems	28
<i>Melnik V. S.</i> Multi-thread routing in the automated system of account of finite nodes of the distributed cluster....	38
<i>Gerasimov I. V., Kuzmin S. A., Safyannikov N. M., Rudinsky A. V.</i> Complex-functional blocks of computational perception in the class of computational-transformative circuits.....	43
<i>Nazarenko N. A., Paderno P. I.</i> Evaluation of logic complexity and stereotypity of cyclic structures in operator activity algorithms	52
<i>Panteleyev M. G., Salimov A. F.</i> Analysis of intelligent agent's navigation algorithms in a virtual football.....	60

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Belov M. P., Truong D. D., Lanh N. V.</i> Development of a mathematical model and control by the method of separation of the control law for the exoskeleton.....	71
<i>Tatarintsev N. I., Karasyov D. S.</i> Energy-saving mode application in the variable-frequency induction electric drive	77
<i>Ntawuhorakomeye N., Ndayragije L.</i> Design and development of a cost-effective controller for autonomous solar power plant.....	82
<i>Information about the authors</i>	89
<i>Rules of Presentation and Preparation of Manuscripts Offered for Journal Publication</i>	93

Editor
N. V. Lukina
DTP Professional
I. S. Belyaeva

Editorial address:
Saint Petersburg Electrotechnical
University (ETU),
5, Prof. Popov Str., 197376,
St. Petersburg, Russia
Tel.: +7 (812) 234-02-23
E-mail: izvestiya-leti@yandex.ru
www.izv.eltech.ru

УДК 621.865.8

И. К. Хмельницкий, В. М. Айвазян, Н. И. Алексеев,
А. П. Бройко, В. Е. Калёнов, Д. О. Тестов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Получение и исследование пленок PEDOT в качестве электродов ионных электроактивных актюаторов

*Ионные полимер-полимерные композиты (ИППК) представляют собой синтетические композитные наноматериалы, которые состоят из пористого ионообменного полимера, насыщенного электролитическим раствором и покрытого с обеих сторон электродами из проводящего полимера. Представлена технология изготовления полимерных электродов из поли(3,4-этилендиокситиофена) (PEDOT) методом *in situ* полимеризации на поверхности ионообменной мембраны. Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы ионных электроактивных актюаторов с PEDOT-электродами. Измерены амплитуды отклонения, частотные и силовые характеристики полученных актюаторов. Исследовано влияние использованного растворителя внутри мембраны, а также времени полимеризации EDOT на структуру образцов и выходные характеристики актюаторов. Показано, что на значения амплитуды отклонения, положения механического резонанса и создаваемой силы влияет время полимеризации EDOT. Это связано с тем, что увеличение времени полимеризации приводит к уменьшению сопротивления электродов и повышению плотности пленки и жесткости образца. Показано, что наибольшие амплитуды отклонения актюаторов достигаются за счет использования воды в качестве растворителя.*

Электроактивные полимеры, проводящие полимеры, актюаторы, ИППК, PEDOT

В последние годы инновационные материалы для актюаторов вызывают большой интерес, что приводит к появлению актюаторных технологий, которые могут подходить для автоматического приведения устройств в действие. Это касается широкого спектра устройств – от пневматических и пьезоэлектрических актюаторов до актюаторов на основе электроактивных полимеров (ЭАП) [1]. Особенно перспективны ЭАП, которые изменяют форму и/или размеры под действием электрического поля. Благодаря легкости изготовления, гибкости, химической стабильности, биосовместимости и большому сроку службы, устройства на их основе востребованы в машиностроении, биомеханике, аэрокосмической отрасли и робототехнике [2].

Одним из видов ЭАП являются ионные полимер-металлические композиты (ИПМК). Структуры на их основе представляют собой синтетические композитные наноматериалы, которые состоят из пористого ионообменного полимера, насыщенного электролитическим раствором и

покрытого с обеих сторон металлическими электродами. ИПМК-актюатор является физически легким и гибким, характеризуется большой электрической емкостью, а также может приводиться в действие низким управляющим напряжением 1...2 В [3], [4].

Несмотря на множество достоинств ИПМК-структур, для создания в них электродов необходимы дорогостоящие благородные металлы. Кроме того, при высокой плотности частицы металла контактируют и коагулируют друг с другом, делая электроды хрупкими. В результате многократного изгиба ИПМК-актюатора на его электродах появляются трещины, что приводит к потере проводимости с течением времени [5], [6].

Одним из путей решения проблем служит использование более гибких и непроницаемых для электролитов материалов. Результатом эволюционного развития ИПМК-структур являются структуры на основе ионных полимер-полимерных композитов (ИППК), в которых металли-

ческие электроды заменены полимерными [7]. В этом новом виде преобразователей используются полимеры, которые становятся все более доступными и характеризуются высокими значениями проводимости [8]. Такая система имеет огромный потенциал применений, поскольку сочетает в себе возможность разрабатывать гибкие подложки с низкими издержками производства, сохраняя при этом способность к электрохимическим преобразованиям, низкое требуемое напряжение, легкость и пластичность [9].

Одним из хорошо известных и широко используемых проводящих полимеров является поли(3,4-этилендиокситиофен)-поли(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS). Сам поли(3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT) нерастворим, но если он синтезируется в присутствии полистиролсульфоната (PSS), то получается водная дисперсия. Поликатионные цепочки PEDOT включены в полианионную матрицу PSS для компенсации зарядов. PEDOT при допировании PSS приобретает проводимость *p*-типа и может использоваться при производстве электродов [10].

Ранее [7] для создания ИППК-актюаторов был использован метод полива водной дисперсии PEDOT:PSS на поверхность мембраны из Nafion 117, пропитанной растворителем. К сожалению, органические электроды ИППК-актюаторов, изготовленных по данной технологии, разрушаются во время регидратации образцов. В связи с этим в качестве растворителя внутри мембраны вместо воды применялась ионная жидкость тетрафторборат 1-этил-3-метилимидазолия. Поскольку ее вязкость существенно превышает вязкость воды, эффективность электрохимических преобразований снижается.

По этим причинам в данной работе для получения ИППК-актюаторов с PEDOT-электродами применялась *in situ* полимеризация 3,4-этилендиокситиофена (EDOT), которая состояла из следующих стадий [11], [12]:

- обработка поверхности полосок мембраны, имеющих размеры $30 \times 5 \times 0.18$ мм, наждачной бумагой для улучшения адгезии осаждаемых тонких пленок;
- промывание полосок мембраны дистиллированной водой и последующее их кипячение в дистиллированной воде в течение 1 ч;
- приготовление в колбах растворов, содержащих 0.096 мл EDOT, 0.037 г NaPSS и 48 мл H_2O , и их последующее перемешивание в ультразвуковой ванне при 50 °С до тех пор, пока не растворится образовавшийся осадок;

- пропитка полосок мембраны в водных растворах в течение 1 ч;

- удаление полосок мембраны из растворов с последующим добавлением в колбы 0.99 г $FeCl_3$ для проведения полимеризации EDOT;

- погружение полосок мембраны в колбы так, чтобы не возникало контакта с внутренними стенками сосудов;

- перемешивание содержимого колб на магнитной мешалке при разной продолжительности процесса (15 мин, 45 мин, 1 ч) – собственно *in situ* полимеризация;

- удаление образцов из полимеризационных растворов и тщательное промывание их дистиллированной водой;

- кипячение образцов в одномолярном растворе H_2SO_4 в течение 1 ч и в дистиллированной воде в течение 1 ч.

Было обнаружено, что PEDOT обладает высокой адгезией к содержащим сульфонат фторуглеродным матрицам и придает поверхности Nafion 117 сине-черную окраску. Это может быть связано с тем, что в процессе полимеризации группы сульфоновой кислоты Nafion 117 могут служить в качестве противоионов, поэтому нельзя исключать полимеризацию внутри мембраны. Высокая адгезия PEDOT-электродов к мембране подтверждена возможностью регидратации образцов после их использования без деградации.

При исследовании электродов образцов, полученных методом *in situ* полимеризации EDOT, можно заметить, что с увеличением времени полимеризации пленка PEDOT получается более однородной и более плотной, а сам образец – более жестким. При этом толщина электродного слоя пленки на поверхности мембраны изменяется незначительно.

РЭМ-изображения образца, полученного методом *in situ* полимеризации EDOT в течение 45 мин, представлены на рис. 1 (поперечное сечение) и рис. 2 (поверхность образца). Эта морфологическая характеристика позволяет оценить толщину электрода: ~2 мкм. Поверхность электрода получилась достаточно однородной, и на ней отсутствуют трещины, которые могли бы приводить к утечке электролита. Для сравнения: толщина слоя PEDOT:PSS, осажденного на поверхность мембраны методом полива водной дисперсии, составляет ~10 мкм.

Сопротивление поверхности электродов, полученных методом полива, составляет ~50 Ом,

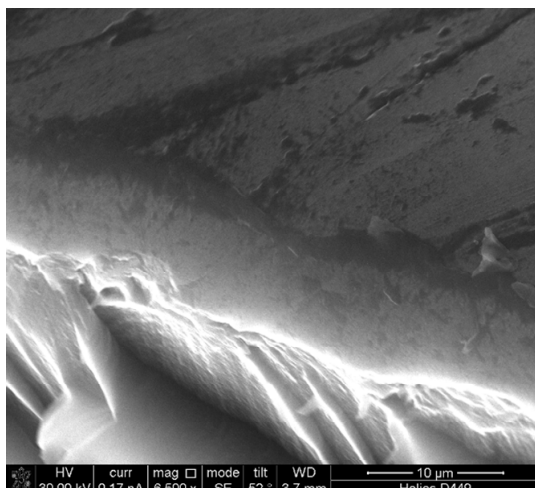


Рис. 1

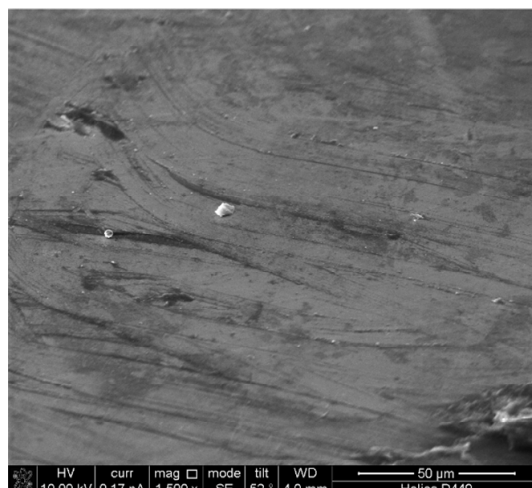


Рис. 2



Рис. 3

что говорит о достаточно высокой проводимости водной дисперсии PEDOT:PSS. В случае метода полимеризации *in situ* наблюдается зависимость сопротивления от времени полимеризации: 15 мин – 7 кОм, 1 ч – 100 Ом. Это различие объясняется тем, что с улучшением однородности электродного слоя проводимость увеличивается.

Блок-схема стенда для измерения параметров ИППК-актюаторов представлена на рис. 3. Исследуемый ИППК-актюатор закреплялся щупами, через которые подавалось напряжение от генератора сигнала Agilent 33500 B Series. Отклонения ИППК-актюатора регистрировались лазерным измерителем перемещения L-GAGE, с которого информация поступала на осциллограф Agilent DSO-X 3014 A и далее – на ПК.

Принцип работы ИППК-актюатора заключается в перераспределении ионов в ионообменной мембране под действием электрического поля, вследствие чего мембрана деформируется. Движение ионов одного знака в мембране под действием электрического поля приводит к появлению электроосмотического потока жидкости от

анода к катоду, вследствие чего у одного из электродов создается избыточное давление жидкости. Разность давлений на электродах приводит к деформации ИППК-актюатора [7].

Были исследованы зависимости амплитуды отклонения ИППК-актюаторов с электродами, полученными различными способами, от управляющего напряжения при частоте 1 Гц (рис. 4). ИППК-актюаторы с электродами из PEDOT:PSS, полученные методом полива, были пропитаны ионной жидкостью, а ИППК-актюаторы из PEDOT, полученные *in situ* полимеризацией, пропитывались водой. Для сравнения были исследованы ИППК-актюаторы с электродами из платины, также пропитанные водой [6].

ИППК-актюаторы, полученные методом *in situ* полимеризации EDOT, способны отклоняться с амплитудами, на порядок большими, чем у актюаторов, полученных методом полива, и даже превосходят ИППК-актюаторы по амплитуде отклонения. С увеличением времени полимеризации амплитуда отклонения ИППК-актюаторов увеличивается. Это объясняется тем, что эффект,

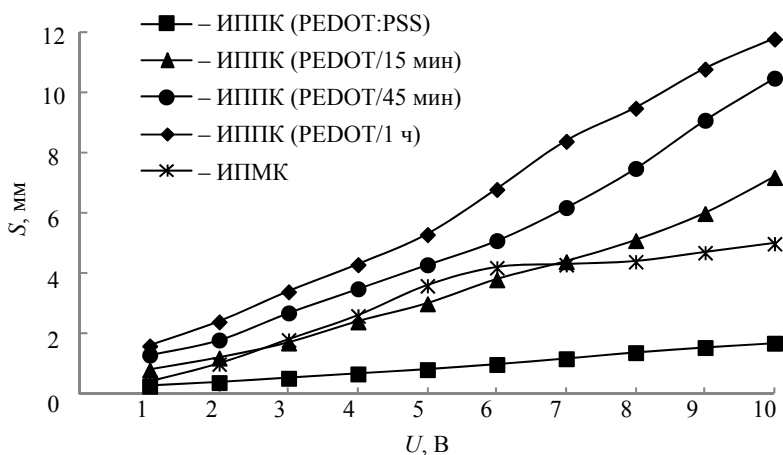


Рис. 4

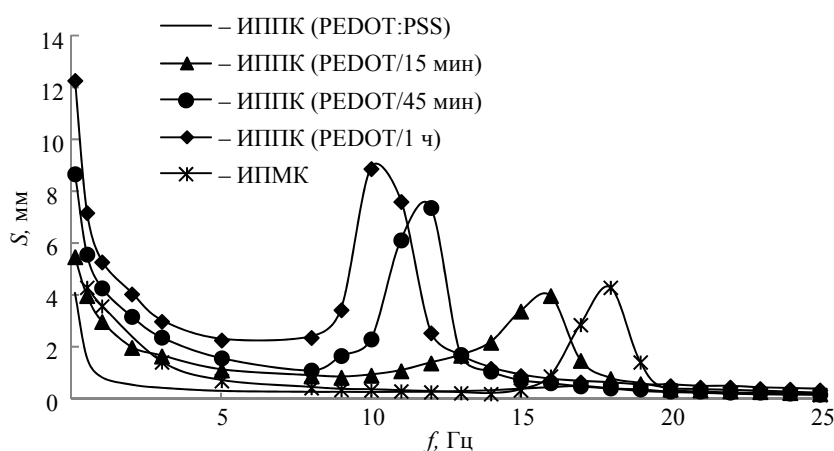


Рис. 5

вызванный уменьшением сопротивления электродов, выражен больше, чем эффект, вызванный увеличением жесткости образцов.

На рис. 5 представлены зависимости амплитуды отклонения ИППК-актюаторов от частоты при амплитуде синусоидального напряжения 5 В. При увеличении частоты управляющего сигнала амплитуда отклонения ИППК-актюатора сначала уменьшается, а затем возрастает, пока не достигнет максимума при резонансной частоте, после чего снова уменьшается (рис. 5). Уменьшение времени полимеризации приводит к сдвигу механического резонанса в область более высоких частот. Это связано с тем, что во время измерений мембрана теряет воду. Такая потеря происходит с большей легкостью через менее плотный полимерный электрод. Все это приводит к тому, что ИППК-актюатор, который теряет большее количество растворителя, имеет более высокую резонансную частоту.

Для измерения силы, создаваемой ИППК-актюатором, к нему прикладывалось постоянное напряжение. В результате этого его конец откло-

нялся от первоначального положения и давил на аналитические весы. Зависимости силы ИППК-актюаторов от постоянного напряжения (рис. 6) показывают, что увеличение времени полимеризации приводит к росту развиваемой силы, что объясняется повышением жесткости образца. Значение максимальной силы ИППК-актюаторов, полученных методом *in situ* полимеризации EDOT, составляет 4.6 мН, что более чем в 2 раза ниже этого показателя у ИПМК-актюаторов. При постоянном напряжении, превышающем 3 В, наступает пробой ИППК-актюатора, полученного методом полива.

Поскольку ИППК-актюаторы, полученные методом *in situ* полимеризации EDOT в течение 1 ч, характеризуются наибольшей эффективностью электромеханических преобразований, была исследована их непрерывная работа на воздухе. Зависимость отклонения ИППК-актюаторов от времени при подаче постоянного напряжения 1 В (рис. 7) показывает, что такие ИППК-актюаторы способны отклоняться в течение 4 мин, причем наибольшее отклонение (8 мм) приходится на первые 10 с. Для сравнения: ИППК-актюаторы,

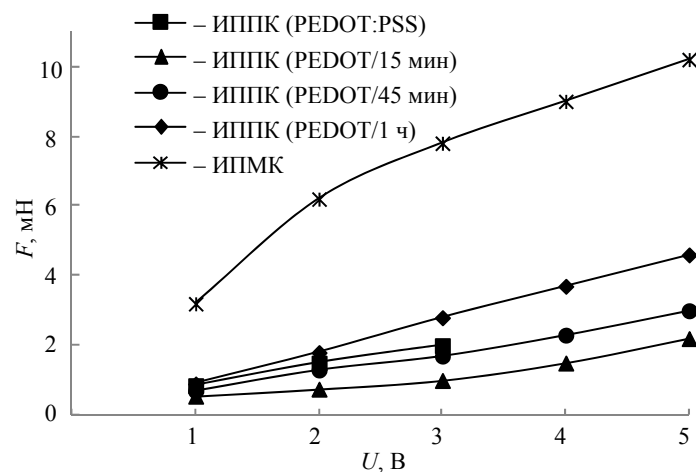


Рис. 6

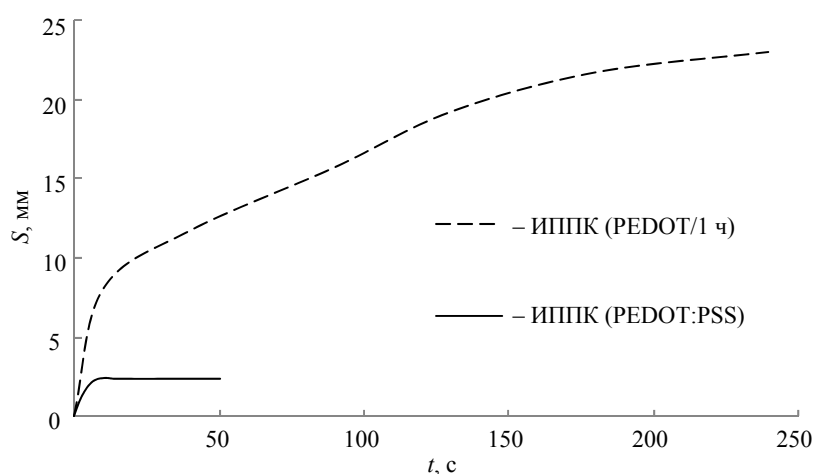


Рис. 7

полученные методом полива, достигают предельного значения отклонения через 10 с работы, причем это значение оказывается на порядок меньше, чем в случае метода полимеризации. При дальнейшей подаче напряжения отклонение практически неизменно.

Зависимость амплитуды отклонения ИППК-актюатора, полученного *in situ* полимеризацией EDOT в течение 1 ч, от времени при амплитуде

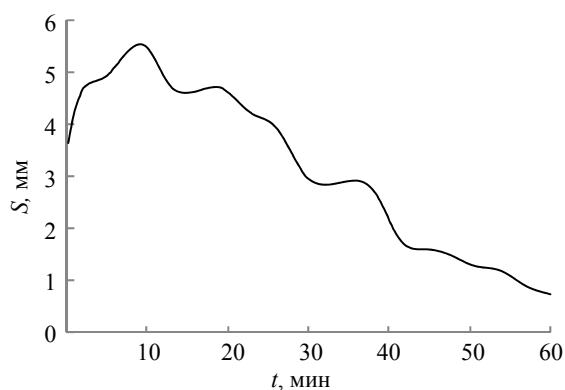


Рис. 8

синусоидального напряжения 5 В и частоте 1 Гц представлена на рис. 8. Видно, что при подаче синусоидального напряжения в течение первых 20 мин работы ИППК-актюатор в среднем отклоняется с амплитудой 5 мм, а наибольшей амплитуды отклонения достигает после 10 мин. В течение следующих 20 мин работы амплитуда отклонения уменьшается примерно в 2 раза. В оставшиеся 20 мин наблюдается постепенное снижение амплитуды отклонения.

Выходные характеристики ИППК-актюаторов сведены в таблицу.

Представлена технология изготовления PEDOT-электродов методом *in situ* полимеризации на поверхности ионообменной мембраны. Показано, что наибольшие амплитуды отклонения достигаются за счет использования воды в качестве растворителя в ИППК-актюаторах. Показано, что на значения амплитуды отклонения, положения механического резонанса и создаваемой силы влияет время полимеризации EDOT. Это связано с тем, что увеличение времени поли-

Материал электродов ИППК-актюатора	Максимальная амплитуда отклонения (при 1 Гц), мм	Резонансная частота, Гц	Максимальная сила, мН
PEDOT:PSS	1.7	17	2.0
PEDOT/15 мин	7.2	16	2.2
PEDOT/45 мин	10.5	12	3.0
PEDOT/1 ч	11.8	10	4.6

меризации приводит к уменьшению сопротивления электродов и повышению плотности пленки и жесткости образца.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ (проект № 16-19-00107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parallel ionic polymer metal composites to generate increased force output / R. C. Richardson, K. Watterson, M. Levesley et al. // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 5051. P. 477–485.
2. Shahinpoor M., Kim K. J. Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications // Smart Mater. Struct. 2005. Vol. 14, № 1. P. 197–214.
3. Актюаторы на основе ионных полимер-металлических композитов / А. В. Корляков, В. В. Лучинин, И. К. Хмельницкий и др. // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 5. С. 277–285.
4. Двигатели на основе электроактивных полимеров для водных биомиметических робототехнических систем / А. П. Бройко, В. Е. Каленов, И. К. Хмельницкий и др. // Биотехносфера. 2017. № 6 (54). С. 21–27.
5. Improvement of Manufacture Technology and Investigation of IPMC actuator electrodes / I. K. Khmel'nitskiy, L. O. Vereshagina, V. E. Kalyonov et al. // Proc. of the 2017 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2017 ElConRus). St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. P. 892–895.
6. Improvement of manufacture technology and research of actuators based on ionic polymer-metal composites / I. K. Khmel'nitskiy, L. O. Vereshagina, V. E. Kalyonov et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 857. № 1. doi 012018.
7. IP2C Electromechanical Actuators and Sensors / I. K. Khmel'nitskiy, V. V. Luchinin, V. E. Kalyonov et al. // Proc. of the 2018 IEEE Conf. of Russian Young Research-

ers in Electrical and Electronic Engineering (2018 ElConRus). St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 415–418.

8. A study on IP2C actuators using ethylene glycol or Eml-Tf as solvent / G. Di Pasquale, L. Fortuna, S. Graziani et al. // Smart Mater. Struct. 2011. Vol. 20, № 4. doi 045014.

9. An investigation of the structure-property relationships in ionic polymer polymer composites (IP2Cs) manufactured by polymerization in situ of PEDOT/PSS on Nafion® 117 / G. Di Pasquale, S. Graziani, F. G. Messina et al. // Smart Mater. Struct. 2014. Vol. 23, № 3. doi 035018.

10. Kus M., Okur S. Electrical characterization of PEDOT:PSS beyond humidity saturation // Sens. Actuators, B. 2009. Vol. 143, № 1. P. 177–181.

11. PEDOT and PANI electrodes for IP2C actuators / I. K. Khmel'nitskiy, V. M. Aivazyan, K. A. Andryukhin et al. // Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2019 ElConRus). St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 815–818.

12. Producing and investigation of PEDOT films as electrodes of ionic electroactive actuators / I. K. Khmel'nitskiy, V. M. Aivazyan, N. I. Alekseev et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1281, № 1. doi 012033.

I. K. Khmel'nitskiy, V. M. Aivazyan, N. I. Alekseev,
A. P. Broyko, V. E. Kalyonov, D. O. Testov
Saint Petersburg Electrotechnical University

PREPARATION AND INVESTIGATION OF PEDOT FILMS AS ELECTRODES OF IONIC ELECTROACTIVE ACTUATORS

Ionic polymer-polymer composites (IP2C) are synthetic composite nanomaterials, which consist of a porous ion-exchange membrane saturated with an electrolytic solution and coated on both sides with electrodes of a conductive polymer. The technique of manufacturing polymer electrodes from poly(3,4-ethylenedioxythiophene) by in situ polymerization on the surface of Nafion 117 membrane is presented. Experimental samples of ionic electroactive actuators with PEDOT electrodes were developed and manufactured. The displacement amplitudes, frequency and power characteristics of the resulting actuators were measured. The effect of the solvent used inside the membrane was investigated, as well as the polymerization time of EDOT on the structure of the samples and the output characteristics of the actuators. It has been shown that the values of the displacement amplitude, the mechanical resonance position and the force created are influenced by the EDOT polymerization time. This fact can be explained that the increase in the polymerization time leads to a decrease in the resistance of the electrodes and an increase in the film density and the hardness of the sample. It has been shown that the maximum displacement amplitudes are achieved by using water as solvent in the actuators.

Electroactive polymers, conductive polymers, actuators, IP2C, PEDOT

УДК 534.22; 537.226.1; 532.62

И. Г. Симаков, Ч. Ж. Гулгенов, С. Б. Базарова
 Институт физического материаловедения
 Сибирского отделения Российской академии наук

Акустоэлектрический метод определения диэлектрических характеристик жидкости в граничном слое

Продemonстрирована возможность применения поверхностных акустических волн для определения диэлектрических характеристик жидкости в слое, граничащем с поверхностью пьезоэлектрического кристалла. Разработан и предложен акустоэлектрический метод определения диэлектрической проницаемости жидкости в граничном слое, основанный на регистрации изменения затухания и скорости поверхностных акустических волн. С помощью этого метода исследованы диэлектрические характеристики адсорбированной воды в диапазоне частот от 40 до 400 МГц. Показано, что зависимость диэлектрической проницаемости адсорбированной воды от относительного давления пара при фиксированной частоте поверхностной волны носит релаксационный характер. Предложенный акустоэлектрический метод позволяет определять диэлектрические характеристики жидкости в наноразмерных граничных слоях.

Акустоэлектрический метод, граничный слой жидкости, диэлектрические характеристики, поверхностные акустические волны, дисперсия скорости поверхностных акустических волн, адсорбция, адсорбированная вода, диэлектрическая релаксация

К числу всеобщих фундаментальных свойств материи относится поляризуемость – способность атомов и молекул к деформации их электронных оболочек во внешнем электрическом поле. Поляризуемость обеспечивает принципиальную возможность образования конденсированного состояния вещества за счет перераспределения электронной плотности между атомами и молекулами и возникновения сил их взаимного притяжения. Благодаря поляризуемости, изначально присущей атомам и молекулам, в природе реализуется принцип самоорганизации, который имеет место в цепи последовательного структурного усложнения: атом – молекула – вещество (жидкость) с различной электронной структурой. В обратном порядке эта цепочка служит концептуальной основой для постановки исследований атомно-молекулярного строения жидкости. Поляризационные свойства вещества в конденсированном состоянии выражаются через диэлектрическую восприимчивость χ . Наряду с диэлектрической восприимчивостью жидкости на практике применяются ее диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = (1 + 4\pi\chi)$ и показатель преломления $n = \varepsilon^{1/2}$.

Кроме деформационной поляризации существует еще ориентационная поляризация ан-

самбля дипольных молекул, обусловленная тем, что внешнее электрическое поле на фоне беспорядочного движения молекул вызывает ориентацию диполей в направлении этого поля и формирует макроскопический электрический момент.

Развитие теории поляризации в настоящее время направлено на поиск непротиворечивых молекулярных моделей, обеспечивающих корректное описание связи между диэлектрическими величинами и параметрами молекулярной структуры.

Современный подход к описанию диэлектрической поляризации основан на представлении диэлектрической проницаемости в виде разложения в ряд по степеням ориентационной поляризуемости. При таком подходе задача теории поляризации переходит в плоскость установления связи диэлектрической проницаемости с корреляционными функциями, а через них – и с энергией межмолекулярного взаимодействия [1].

Другая сторона явления поляризации связана с динамическими процессами теплового движения молекул и атомов. Начало этим исследованиям было положено Дебаем в 1912 г. Было предложено феноменологическое уравнение частотной дисперсии диэлектрической проницаемости. В это уравнение был введен новый параметр тео-

рии – время диэлектрической релаксации. Дебаю также принадлежит первая молекулярная теория диэлектрической релаксации. В ней заложена простейшая модель свободного вращения дипольной сферы. Эта теория согласуется с экспериментом в лучшем случае по порядку величин, однако она оказалась хорошо применима к различным классам жидкостей.

При контакте твердой и жидкой фаз под воздействием поверхностных сил в жидкости образуется граничный слой с измененной структурой. Типичные граничные слои – это тонкие прослойки, смачивающие пленки и адсорбционные слои. Диэлектрические характеристики жидкости в граничной и объемной фазах существенно различаются, особенно в слоях полярных жидкостей [2]. Исследование диэлектрических свойств жидкости в граничной фазе позволяет получать необходимую информацию о ее молекулярной структуре, межмолекулярных взаимодействиях, динамике и механизмах молекулярных процессов. Сведений о диэлектрических характеристиках технологических жидкостей недостаточно в случаях, когда эти жидкости используются в качестве адсорбционных слоев и смачивающих пленок.

В связи с отсутствием теоретических методов расчета диэлектрических свойств жидкостей в граничной фазе для их изучения особое значение имеет применение экспериментальных методов. Определение диэлектрических характеристик жидкости в граничном слое сопряжено с объективными трудностями – малым размером объекта исследования, зависимостью структуры от поверхностных сил и динамическим характером равновесного состояния.

Акустоэлектрический метод определения диэлектрических характеристик жидкости. Для исследования диэлектрических свойств жидкости в граничном слое предлагается использовать поверхностные акустические волны (ПАВ), распространяющиеся в системе «граничный слой жидкости – пьезоэлектрический звукопровод».

Дисперсия ПАВ при взаимодействии с тонким слоем жидкости на поверхности пьезоэлектрика описывается уравнениями [3]

$$-\frac{\Delta v}{v} = \left(\frac{\rho_f v_f}{\rho_s v_s} \operatorname{tg} \theta + \pi K^2 \frac{\varepsilon_p \varepsilon'}{(\varepsilon_p + 1)^2} \right) \frac{h}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\alpha = \left(\beta \frac{\rho_f}{\rho_s} \operatorname{ctg} \theta + \frac{\pi \omega K^2 \varepsilon_p \varepsilon''}{v_s (\varepsilon_p + 1)^2} \right) \frac{h}{\lambda}, \quad (2)$$

где ρ_f и ρ_s – плотности жидкости и твердого тела;

$\varepsilon_p = (\varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} - \varepsilon_{yz}^2)^{1/2}$, ε – относительные диэлектрические проницаемости пьезоэлектрика и жидкости соответственно; $\theta = \arccos(v_f/v_s)$ – угол, под которым звуковые волны распространяются в слое жидкости; v_f – скорость звука в жидкости; v_s – скорость поверхностной волны; h – толщина жидкого слоя; K – коэффициент электромеханической связи. Для волн рэлеевского типа $K^2 = 2(v_0 - v_m)/v_0$ (здесь v_m , v_0 – скорости ПАВ в случаях «металлизированной» и «свободной» поверхностей), λ – длина поверхностной волны, ω – круговая частота, ε_{yy} , ε_{zz} , ε_{yz} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости пьезоэлектрического звукопровода, β – коэффициент ослабления звука в жидкости, который учитывает потери на вязкое трение. Относительное изменение скорости $\Delta v/v$ и затухание ПАВ α пропорциональны толщине жидкого слоя h . Коэффициенты пропорциональности этих уравнений аддитивно учитывают возмущения условий распространения ПАВ, имеющих механическую и электрическую природу. Как следует из уравнений дисперсии ПАВ (1), (2), затухание и изменение скорости зависят от акустических и диэлектрических характеристик слоистой системы.

Исходя из линейных уравнений (1), (2) действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости жидкости в слое $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ связаны с изменением акустических параметров ПАВ следующими выражениями [4]:

$$\varepsilon' = \frac{2(\varepsilon_p + 1)^2}{K^2 \varepsilon_p} \left(\frac{\Delta v}{h\omega} - \frac{\rho_f}{2\pi\rho_s} \sqrt{1 - v_f^2/v_s^2} \right); \quad (3)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_p + 1)^2}{K^2 \varepsilon_p} \left(\frac{2\alpha v_s^2}{h\omega^2} - \frac{\rho_f v_f \beta}{\pi\rho_s \omega \sqrt{1 - v_f^2/v_s^2}} \right). \quad (4)$$

Таким образом, относительную диэлектрическую проницаемость жидкости в граничном слое и тангенс угла ее диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$) можно определить, регистрируя изменения затухания и скорости ПАВ, обусловленные влиянием граничного слоя.

Метод регистрации изменения амплитуды и скорости рэлеевских волн. Для измерения затухания и скорости ПАВ можно воспользоваться

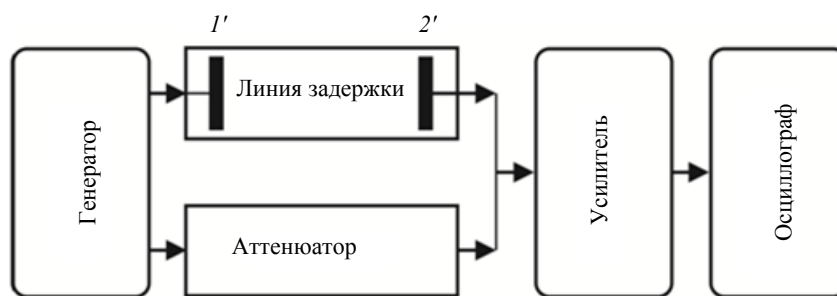


Рис. 1

фазово-интерференционным методом [5]. Блок-схема установки для измерения малых изменений затухания и скорости поверхностных акустических волн представлена на рис. 1. Установка включает в себя генератор сигналов, линию задержки, аттенюатор, усилитель и осциллограф. Линия задержки представляет собой пластину из пьезоэлектрического кристалла толщиной около 1 мм (звукопровод), на поверхности которой сформированы два встречно-штыревых преобразователя (ВШП).

С генератора высокой частоты сигнал передается на аттенюатор и линию задержки ПАВ. Звукопровод линии задержки ПАВ представляет собой плоскопараллельную пластинку, вырезанную из пьезокристалла ниобата лития (YZ-срез). На полированной поверхности звукопровода изготовлены излучающий 1' и приемный 2' ПАВ-преобразователи встречно-штыревого типа. Электрические сигналы: задержанный с приемного преобразователя 2' и прямой, ослабленный аттенюатором до амплитуды задержанного сигнала, интерферируют на входном сопротивлении регистрирующего устройства. Результирующий сигнал измеряется регистрирующим устройством, которое включает в себя усилитель и осциллограф [5].

Результирующий сигнал определяется соотношением фаз и амплитуд прямого и задержанного сигналов. Чтобы не перегрузить усилитель, на вход регистрирующего устройства необходимо подавать прямой и задержанный сигналы в противофазе, предварительно выровняв их по амплитуде. Режим противофазной интерференции достигается перестройкой частоты генератора, а баланс амплитуд – регулировкой аттенюатора. В обоих случаях добиваются минимальной амплитуды сигнала на выходе регистрирующего устройства [5].

Изменение условий распространения упругих возмущений с ростом толщины адсорбционного слоя приводит к уменьшению амплитуды и ско-

рости ПАВ и, как следствие, к изменению частоты интерференционного минимума. Новое значение частоты интерференционного минимума регистрируется частотомером. Относительное изменение скорости поверхностных волн можно вычислить из соотношения $\Delta v/v = \Delta f/f$. Затухание ПАВ можно определить по разнице амплитуд результирующих сигналов, измеренных до и после изменения толщины адсорбционного слоя на соответствующих частотах интерференционного минимума.

Апробация метода. Описанный акустоэлектрический метод определения диэлектрических характеристик граничных жидкостей был экспериментально апробирован на адсорбированной воде. Для проведения диэлектрических исследований была разработана и изготовлена измерительная ячейка (рис. 2). Линия задержки представляла собой кристалл ниобата лития YZ-среза с оптически полированной рабочей поверхностью, на которой сформированы два ВШП. В эксперименте звукопровод помещался в замкнутый термостатированный объем над поверхностью бидистиллированной воды (рис. 2).

В парогазовой среде на поверхности звукопровода в результате адсорбции образуется тонкий граничный слой воды. Пары воды адсорбировались и, соответственно, слой формировался на рабочей поверхности звукопровода между излучающим и приемным ВШП. Предварительно поверхность звукопровода очищалась в тлеющем разряде. Толщина жидкого слоя при полимолекулярной адсорбции зависит от температуры и давления пара этой жидкости в зоне адсорбции, а также от лиофильности адсорбирующей поверхности звукопровода. Конечные размеры звукопровода приводят к тому, что появляются паразитные сигналы, обусловленные отражением ПАВ от торцов. Чтобы устранить действие этих сигналов на поверхность звукопровода, возле торцов наносились поглощающие покрытия.

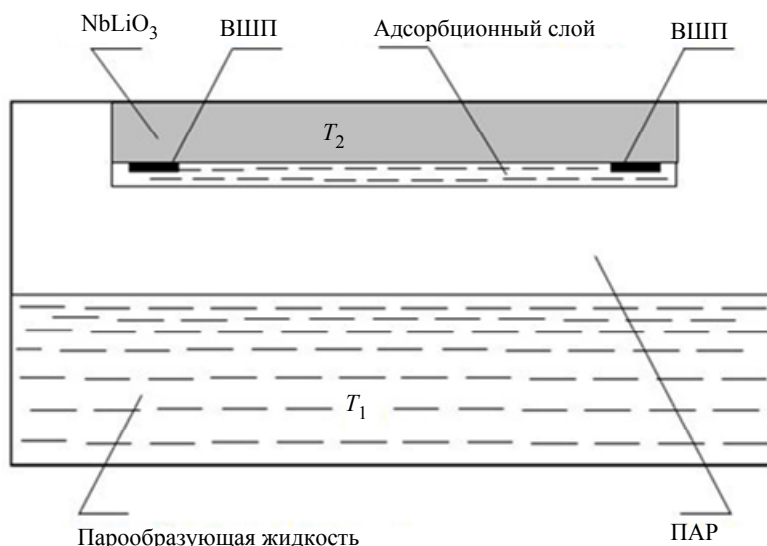


Рис. 2

В измерительной ячейке была предусмотрена возможность проводить акустические измерения и измерение толщины жидкого слоя эллипсометрическим методом. Температуру парообразующей жидкости и температуру звукопровода регулировали и поддерживали с помощью термостатов. Регулируя температуры парообразующей жидкости T_1 и звукопровода T_2 , можно задавать давление пара в зоне адсорбции. Для вычисления давления пара в этой зоне удобно воспользоваться уравнением Клапейрона–Клаузиуса:

$$\ln \frac{p}{p_s} = -\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

где Q и R – теплота испарения (конденсации) воды и газовая постоянная [5]. Необходимое давление пара p в зоне адсорбции задавалось и контролировалось с точностью 0.1 %.

В эксперименте температура адсорбирующей поверхности звукопровода составляла 20 °С. Температура парообразующей жидкости варьировалась в диапазоне от 0 до 20 °С. Для определения диэлектрических характеристик адсорбированной жидкости регистрировали изменения затухания и скорости ПАВ, обусловленные влиянием адсорбционного слоя. Затем, используя результаты этих измерений, вычисляли значения ϵ' и ϵ'' по формулам (3), (4).

Измерения проводились с помощью фазоинтерференционного метода при разных значениях центральной частоты в диапазоне 40...400 МГц. Толщину адсорбционного слоя определяли из изотермы адсорбции $h(p/p_s)_T$, а также по пара-

метрам эллиптической поляризации отраженного лазерного луча.

На рис. 3 представлена зависимость диэлектрической проницаемости адсорбированной воды от относительного давления пара (соответственно, толщины адсорбционного слоя). Кривая 1 соответствует частоте $f = 43.2$ МГц, а кривая 2 – $f = 388.8$ МГц. Характер экспериментальной зависимости указывает на наличие релаксационного процесса со временем релаксации $\tau \sim 10^{-8}$ с. В объемной воде ближайшим по времени релаксационным процессом (со временем релаксации порядка 10^{-10} с) является диэлектрическая релаксация Дебая [6].

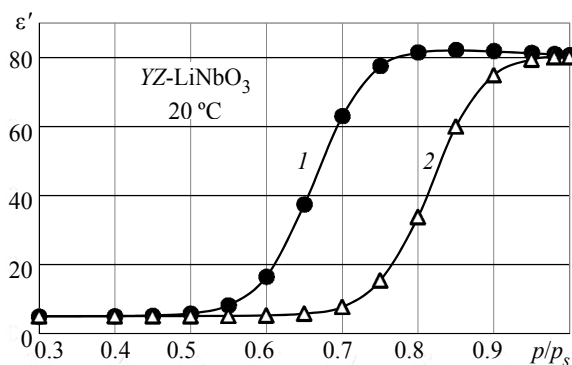


Рис. 3

С ростом частоты поверхностных волн область релаксации диэлектрической проницаемости адсорбированной воды смещается в область более высоких значений давления пара, при этом характер кривой остается практически неизменным. Это явление можно объяснить, если предположить что изменение времени диэлектрической

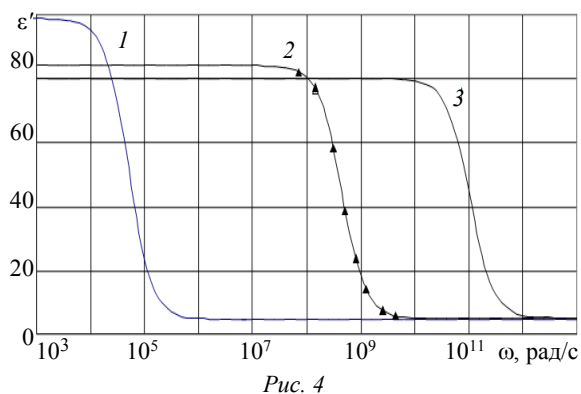


Рис. 4

релаксации адсорбированной воды и толщины адсорбционного слоя имеют экспоненциальную зависимость от давления пара p/p_s .

На рис. 4 представлена дисперсия диэлектрической проницаемости воды в трех состояниях: 1 – лед, 2 – адсорбированная вода, 3 – жидкая вода. Численная оценка проводилась в диапазоне частот 20...400 МГц с использованием действительной части уравнения Дебая. Маркерами обозначены экспериментальные данные диэлектрической проницаемости адсорбированной воды, рассчитанные с использованием уравнения (3) [6].

Существенное увеличение времени диэлектрической релаксации адсорбированной воды по сравнению с водой в жидкой фазе, предположительно, обусловлено изменением ее структуры под воздействием поля адсорбционных сил. Ана-

лиз результатов эксперимента и численных оценок (рис. 4) показывает, что частотная зависимость диэлектрической проницаемости адсорбированной воды хорошо согласуется с уравнением Дебая. Структурирующее воздействие поля адсорбционных сил должно усиливаться с уменьшением толщины адсорбционного слоя и температуры жидкости, которое приводит к возрастанию вязкости и времени диэлектрической релаксации адсорбированной воды.

Таким образом, поверхностные акустические волны, распространяющиеся в системе «граничный слой жидкости – пьезоэлектрический звукопровод», могут успешно использоваться в качестве инструмента исследования диэлектрических характеристик жидкости в граничном слое. Предложен метод, позволяющий определить дисперсию диэлектрических характеристик (ϵ' , ϵ'' , $\lg \delta = \epsilon''/\epsilon'$) и время диэлектрической релаксации τ на основе измерения относительного изменения скорости и затухания поверхностных акустических волн на разных частотах. Процесс диэлектрической релаксации в адсорбированной воде, как и в случае объемной воды, может быть охарактеризован в рамках теории Дебая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапов А. А. Ориентационная поляризация: Поиск оптимальных моделей. Новосибирск: Наука, 2000. 336 с.
2. Чураев Н. В. Тонкие слои жидкостей. Развитие исследований поверхностных сил // Коллоидный журн. 2000. Т. 62, № 5. С. 581–589.
3. Гулгенов Ч. Ж. Исследование теплофизических параметров граничных слоев полярных жидкостей акустоэлектронными методами: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Восточно-Сибирский гос. технол. ун-т, Улан-Удэ, 2010. 112 с.
4. Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж., Гомбоев Р. И. Взаимодействие поверхностных акустических волн с

адсорбированной водой на поверхности ниобата лития // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2009. Вып. 2. Химия. Физика. С. 167–171.

5. Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж. Регистрация изменения амплитуды и скорости рэлеевских волн на поверхности пьезоэлектрика // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2011. Вып. 3. Химия. Физика. С. 216–220.

6. Симаков И. Г., Базарова С. Б. Инструментарий исследования диэлектрических свойств адсорбированной воды // Пробл. механики совр. машин: материалы VII Междунар. науч. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. С. 305–308.

I. G. Simakov, Ch. Zh. Gulgenov, S. B. Bazarova

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ACOUSTOELECTRIC METHOD FOR DETERMINING THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF A FLUID IN THE BOUNDARY LAYER

Using surface acoustic waves to determine the dielectric characteristics of a liquid in the boundary layer is demonstrated. An acoustoelectric method for determining the dielectric constant of a liquid in the boundary layer is proposed. The dielectric characteristics of adsorbed water in the frequency range from 40 to 400 MHz are investigated. It is shown that the dependence of the dielectric permittivity of adsorbed water on vapor pressure at a fixed frequency of the surface wave is of a relaxation character. The developed acoustoelectric method allows one to study the electrophysical properties of nanoscale coatings and films. This method can successfully complement existing methods for studying the dielectric characteristics of boundary layers of liquids and relaxation processes in them.

Acoustoelectric method, boundary layer of a liquid, dielectric characteristics, surface acoustic waves, velocity dispersion of surface acoustic waves, adsorption, adsorbed water, dielectric relaxation

УДК 620.179.16

А. В. Вагин, А. М. Инюкина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Уменьшение коэффициента отражения звуковой волны от слоистой среды при нормальном падении

Исследована возможность уменьшения коэффициента отражения «звуковой волны давления», падающей нормально на поверхность слоистой среды. Для уменьшения коэффициента отражения звуковой волны выбран метод введения дополнительных слоев с параметрами плотность и скорость звука, которые обеспечивают плавный переход от одной среды к другой с минимальными потерями энергии на распространение. В качестве исследуемой модели такой среды используется структура «углеродистая сталь – металлургический шлак», разделенная на три и десять слоев с переходными параметрами, изменяющимися линейно. В работе построены зависимости коэффициента отражения от круговой частоты при двух вариантах введения количества переходных слоев: три и десять. Показано, что при увеличении количества переходных слоев между средами происходит уменьшение коэффициента отражения звука.

Коэффициент отражения, нормальное падение, наклонное падение, слоистая среда, переходный слой, плотность среды, скорость звука

При построении математических моделей, описывающих физические процессы в слоистых композитных средах различной толщины и параметров материалов, часто представляет интерес оценка коэффициента отражения волны от системы этих слоев. В настоящее время разнообразие конструкционных материалов в современном производстве чрезвычайно велико и имеет устойчивую тенденцию к нарастанию [1].

Расширение номенклатуры используемых материалов опирается на создание новых технологий, что в свою очередь сопровождается появле-

нием новых задач в области структуроскопии и дефектоскопии. Разработка таких средств контроля и диагностики должна опираться на физические предпосылки, связанные с особенностями волновых процессов в периодических слоистых средах.

Интерес к таким средам обусловлен тем фактом, что слоистые среды хорошо моделируют свойства не только сред геологического происхождения, но и композиционных материалов, а также материалов, применяемых в аддитивных технологиях. Известным примером применения результатов анализа теории слоистых сред могут

служить многослойные диэлектрические покрытия, используемые для снижения или повышения коэффициента отражения света от поверхностей линз или зеркал. Также в промышленности все большее распространение находят слоистые композитные материалы, изготовленные из различных компонентов – металлов, полимеров, стеклотканей и т. д. Такие материалы используются в тех случаях, когда необходимо получить высокие механические и термические характеристики вдоль определенных направлений. Соответствующие задачи решаются в авиации и космической технике [2].

В механике композитных материалов исследование прохождения звука через плоский слой композита некоторой фиксированной толщины h представляет важный класс задач. Актуальность таких задач вызвана потребностью современной промышленности в конструировании новых композитных материалов с высокими звукоизолирующими свойствами. Такие материалы, с одной стороны, должны обладать большой прочностью и жесткостью, а с другой – небольшим удельным весом. С этой точки зрения наиболее перспективными представляются композиты, состоящие из плотного упругого материала и достаточно легко вязкоупругого полимера. В свою очередь, среди таких смешанных композитов преимуществом по скорости поиска оптимального сочетания компонентов обладают именно слоистые периодические структуры [3].

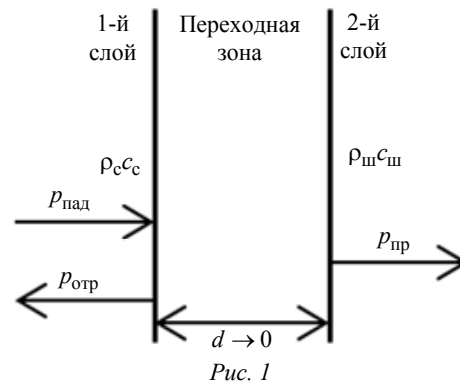
Целью статьи является исследование отражающих свойств поверхности слоистой структуры при нормальном падении волны, а также в случае включения между средами переходного согласующего слоя.

При организации исследования композитной структуры с помощью акустических свойств контроля, а также включения в слоистую структуру переходной зоны для уменьшения отражения падающей волны обязательным этапом являются предизмерительные изыскания, предпринимаемые с целью получения максимального количества информации о строении слоистой структуры и возможного материала переходного слоя.

Для обеспечения минимального отражения при прохождении волны из среды в среду с различными параметрами необходимо согласовать импедансы этих сред. Существует несколько способов согласования импедансов. Один из них заключается во введении между двумя рассматрива-

емыми средами переходной зоны, в которой параметры материала: плотность и скорость звука, плавно изменяются от слоя к слою [3].

Рассмотрим случай нормального падения волны давления на модель слоистой структуры (рис. 1). В качестве первого слоя рассматриваем углеродистую сталь, а в качестве второго – металлургический шлак.



На рис. 1 обозначены: ρ_c – плотность стали, c_c – скорость звука в стали, $\rho_{ш}$ – плотность шлака, $c_{ш}$ – скорость звука в шлаке, $p_{пад}$ – давление падающей звуковой волны, $p_{пр}$ – давление преломленной звуковой волны, $p_{отр}$ – давление отраженной звуковой волны, d – толщина переходной зоны.

Параметры для структуры «углеродистая сталь – металлургический шлак» известны. Пусть толщина переходной зоны $d \rightarrow 0$. В этом случае граница между сталью и шлаком будет резкой, т. е. параметры стали резким скачком переходят к значениям параметров в шлаке, что влечет за собой повышение коэффициента отражения падающей волны.

Как известно из [4], коэффициент отражения для двух твердых полупространств при резкой границе раздела имеет следующий вид:

$$R = \frac{Z_c - Z_{ш}}{Z_c + Z_{ш}},$$

где $Z_c = \rho_c c_c$ – акустическое сопротивление стали; $Z_{ш} = \rho_{ш} c_{ш}$ – акустическое сопротивление шлака.

Тогда коэффициент отражения для структуры «сталь–шлак» получается равным $R = 0.716$. Большое значение коэффициента отражения обусловливается значительной разницей между волновыми сопротивлениями стали и шлака. Для обеспечения более эффективного прохождения волны через слоистую структуру достаточно добиться возможности согласования двух сред по

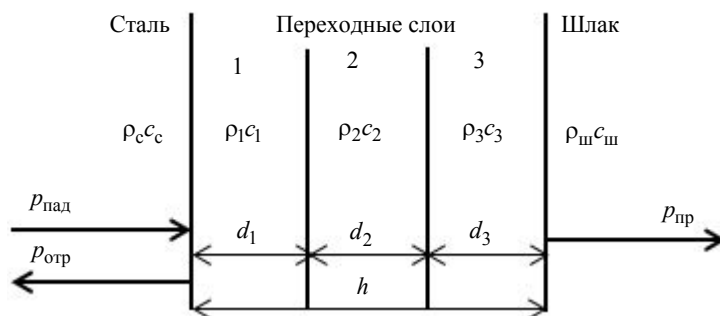


Рис. 2

импедансам с помощью введения переходной зоны между средами. Необходимо, чтобы ее параметры – плотность и скорость звука, линейно изменялись, что даст более интенсивную передачу энергии от слоя к слою.

Однако стоит отметить, что практическая реализация данного решения сложна и трудоемка.

Теперь рассмотрим случай введения переходной зоны между средами сталь–шлак. Пусть между границами стали и шлака имеется трех-слойная переходная зона с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщина каждого слоя одинакова и равна $d_1 = d_2 = d_3 = 0.083$ мм (рис. 2). Для стали и шлака значения плотности и скорости звука имеют следующие числовые значения: $\rho_c = 7.8 \cdot 10^3$, $\rho_{ш} = 2.25 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_c = 5.92 \cdot 10^3$ м/с, $c_{ш} = 3.39 \cdot 10^3$ м/с.

На рис. 2 $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$, $\rho_3 c_3$ – параметры (импедансы) и d_1 , d_2 , d_3 – толщины 1-го, 2-го, 3-го слоев; h – общая толщина переходной зоны.

На значение входного импеданса слоев влияет не только толщина каждого слоя, но и собственное волновое сопротивление слоев. Каждый предыдущий слой влияет на импеданс последующего, т. е. импедансом нагрузки $(n-1)$ -го слоя является входной импеданс n -го слоя. Наличие переходной зоны обеспечит плавный переход волны из стали в шлак через среду с линейно увеличивающимися параметрами $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$, $\rho_3 c_3$.

Значения плотности и скорости звука для слоев рассчитываются исходя из известных плотностей и скоростей звука в стали и шлаке.

Определим значения плотности $\rho_{п.з}$ и скорости звука $c_{п.з}$ переходной зоны относительно слоев стали и шлака, которые должны присутствовать в общей структуре без разделения на отдельные слои:

$$\rho_{п.з} = \frac{\rho_c - \rho_{ш}}{4} = 1387.5 \text{ кг/м}^3,$$

$$c_{п.з} = \frac{c_c - c_{ш}}{4} = 632.5 \text{ м/с.}$$

Тогда требуемые значения плотности в каждом из слоев переходной зоны будут находиться следующим образом:

$$\rho_1 = \rho_c - \rho_{п.з} = 6412.5 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_2 = \rho_c - 2\rho_{п.з} = 5025 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_3 = \rho_c - 3\rho_{п.з} = 3637.5 \text{ кг/м}^3,$$

а значения скорости звука –

$$c_1 = c_c - c_{п.з} = 5287.5 \text{ м/с};$$

$$c_2 = c_c - 2c_{п.з} = 4655 \text{ м/с};$$

$$c_3 = c_c - 3c_{п.з} = 4022.5 \text{ м/с.}$$

Определим значения импедансов в каждом из слоев переходной зоны:

$$Z_1 = \rho_1 c_1 = 33.906 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$$Z_2 = \rho_2 c_2 = 23.391 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$$Z_3 = \rho_3 c_3 = 14.631 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Как известно из [4], выражение для определения входного импеданса системы, состоящей из n слоев, имеет следующий вид:

$$Z_{вх\ n} = \frac{Z_{вх\ n-1} - iZ_n \operatorname{tg}(k_n d_n)}{Z_n - iZ_{вх\ n-1} \operatorname{tg}(k_n d_n)} Z_n,$$

где $Z_{вх\ n-1}$ – значение входного импеданса предыдущего слоя; Z_n – импеданс искомого слоя; k_n – волновое число; d_n – толщина искомого слоя.

Тогда значения входных импедансов системы

$$Z_{вх\ 1} = \frac{\rho_{ш} c_{ш} - iZ_3 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_3 - i\rho_{ш} c_{ш} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_3;$$

$$Z_{вх\ 2} = \frac{Z_{вх\ 1} - iZ_2 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_2 - iZ_{вх\ 1} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_2;$$

$$Z_{вх\ 3} = \frac{Z_{вх\ 2} - iZ_1 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_1 - iZ_{вх\ 2} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_1.$$

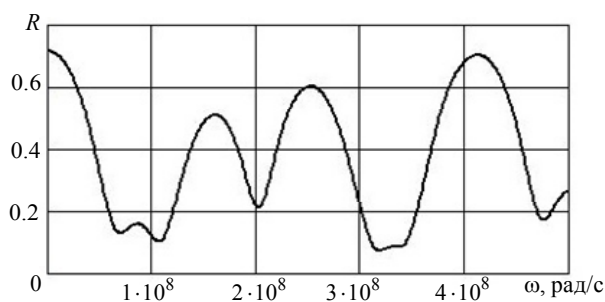


Рис. 3

Используя рекуррентное выражение для расчета входных импедансов слоев, запишем формулу для расчета коэффициента отражения от системы, состоящей из n твердых слоев:

$$R = \frac{Z_{\text{вх } n} - Z_{n+1}}{Z_{\text{вх } n} + Z_{n+1}},$$

где Z_{n+1} – импеданс среды, из которой падает волна. В рассматриваемом случае волна падает из углеродистой стали.

Определим коэффициент отражения от системы, состоящей из 3 слоев, согласно формуле

$$R = \frac{Z_{\text{вх } 3} - \rho_c c_c}{Z_{\text{вх } 3} + \rho_c c_c}.$$

Построим графическую зависимость коэффициента отражения R от круговой частоты ω (рис. 3).

Графическая зависимость, представленная на рис. 3, имеет осциллирующий характер, что обусловливается интерференционной природой волнового поля внутри слоя. Волны, отраженные от нижней границы, складываются с волнами, отраженными от верхней границы, либо в фазе, либо в противофазе [5].

Диапазон, в котором изменяется коэффициент отражения R , зависит от степени рассогласования волновых сопротивлений слоя и окружающего полупространства. Из графической зависимости видно, что диапазон коэффициента отражения не

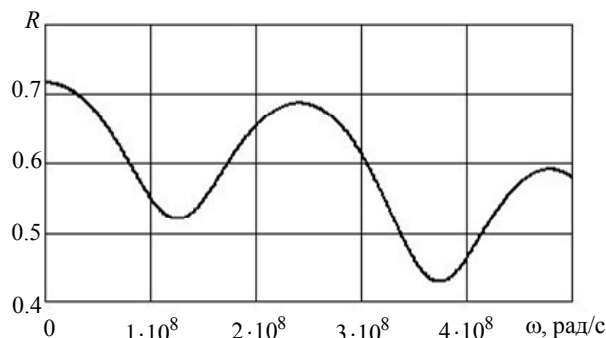


Рис. 4

превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. Следовательно, при разделении переходной зоны толщиной h на три слоя одинаковой толщины d , отражение от поверхности слоистой структуры уменьшается, хотя и несущественно.

Отметим, что рассмотренный случай – это идеализация. На практике достаточно сложно реализовать одинаковую толщину слоев в переходной зоне между двумя твердыми средами. Рассмотрим задачу, когда толщины слоев имеют случайные значения в пределах переходной зоны.

Пусть между границами стали и шлака имеется трехслойная переходная зона с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщина каждого слоя различна: $d_1 = 0.005$ мм, $d_2 = 0.155$ мм, $d_3 = 0.09$ мм, и в сумме составляет величину h . Для данного случая на рис. 4 представлена графическая зависимость коэффициента отражения от круговой частоты.

Из графической зависимости видно, что диапазон изменения коэффициента отражения также не превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. Следовательно, даже при случайной толщине слоев можно добиться уменьшения отражающей способности.

Аналогичные расчеты проведем для случая, когда между границами стали и шлака имеется

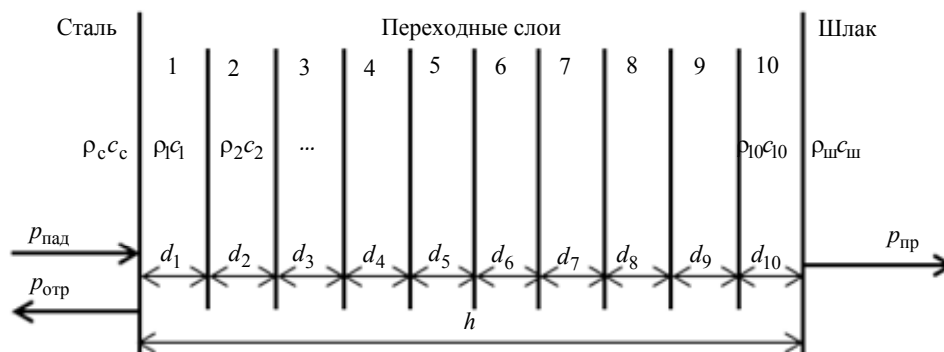


Рис. 5

десятислойная переходная зона с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщина каждого слоя одинакова и равна $d_1 = d_2 \dots = d_{10} = 0.025$ мм (рис. 5).

На рис. 5 $\rho_1 c_1, \rho_2 c_2, \dots, \rho_{10} c_{10}$ – параметры (импедансы), $d_1, d_2, \dots, d_{10}$ – толщины 1-го, 2-го, ..., 10-го слоев; h – общая толщина переходного слоя.

Значения плотности и скорости звука 1-го, 2-го, ..., 10-го слоев рассчитываются исходя из известных плотностей и скоростей звука в стали и шлаке аналогично расчетам, проведенным ранее. Требуемые значения плотности, скорости и импеданса в каждом из слоев переходной зоны приведены в таблице.

Плотность звукa, кг/м ³	Скорость звукa, м/с	Импеданс, 10 ⁶ кг/(м ² ·с)
7295.4	5690	41.51
6790.9	5460	37.07
6286.4	5230	32.87
5781.8	5000	28.90
5277.3	4770	25.17
4772.7	4540	21.66
4268.7	4310	18.39
3763.7	4080	15.35
3259.1	3850	12.54
2754.6	3620	9.97

Учтем, что толщина слоев $d_1, d_2, \dots, d_{10}$ одинакова и равна $d = 0.025 \cdot 10^{-3}$ м. Определим значения входных импедансов системы:

$$Z_{\text{BX } 1} = \frac{\rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} - i Z_{10} \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_{10} - i \rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_{10};$$

$$Z_{\text{BX } 2} = \frac{Z_{\text{BX } 1} - i Z_9 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_9 - i Z_{\text{BX } 1} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_9;$$

$$Z_{\text{BX } 3} = \frac{Z_{\text{BX } 2} - i Z_8 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_8 - i Z_{\text{BX } 2} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_8;$$

$$Z_{\text{BX } 4} = \frac{\rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} - i Z_7 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_7 - i \rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_7;$$

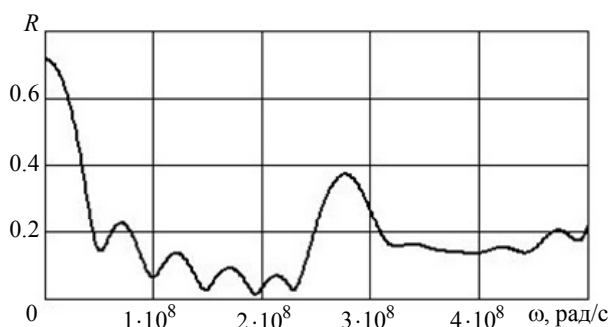


Рис. 6

$$Z_{\text{BX } 5} = \frac{Z_{\text{BX } 4} - i Z_6 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_6 - i Z_{\text{BX } 4} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_6;$$

$$Z_{\text{BX } 6} = \frac{Z_{\text{BX } 5} - i Z_5 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_5 - i Z_{\text{BX } 5} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_5;$$

$$Z_{\text{BX } 7} = \frac{\rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} - i Z_4 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_4 - i \rho_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_4;$$

$$Z_{\text{BX } 8} = \frac{Z_{\text{BX } 7} - i Z_3 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_3 - i Z_{\text{BX } 7} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_3;$$

$$Z_{\text{BX } 9} = \frac{Z_{\text{BX } 8} - i Z_2 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_2 - i Z_{\text{BX } 8} \operatorname{tg}(k_1 d)} Z_2;$$

$$Z_{\text{BX } 10} = \frac{Z_{\text{BX } 9} - i Z_1 \operatorname{tg}(k_0 d)}{Z_1 - i Z_{\text{BX } 9} \operatorname{tg}(k_0 d)} Z_1.$$

Зависимость коэффициента отражения R от системы, состоящей из 10 слоев, рассчитывается согласно формуле

$$R = \frac{Z_{\text{BX } 10} - \rho_c c_c}{Z_{\text{BX } 10} + \rho_c c_c}.$$

Построим графическую зависимость коэффициента отражения R от круговой частоты ω для такого случая (рис. 6).

Диапазон, в котором изменяется коэффициент отражения R , зависит от степени рассогласования волновых сопротивлений слоя и окружающего полупространства. Из графической зависимости, представленной на рис. 6, видно, что диапазон коэффициента отражения не превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. При разделении переходной зоны на 10 слоев одинаковой толщины коэффициент отражения в заданном диапазоне частот значительно меньше, чем при разделении на 3 слоя.

Рассмотрим задачу, когда толщины слоев имеют случайные значения. Пусть между границами стали и шлака имеется десятислойный пе-

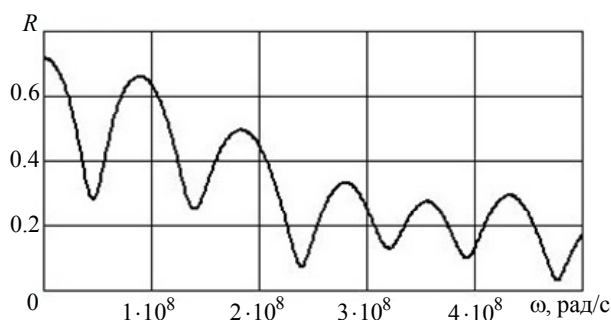


Рис. 7

переходный слой с общей толщиной $h = 0.25$ мм. Толщины каждого слоя различны: $d_1 = 0.0063$ мм, $d_2 = 0.0084$ мм, $d_3 = 0.0035$ мм, $d_4 = 0.016$ мм, $d_5 = 0.00071$ мм, $d_6 = 0.166$ мм, $d_7 = 0.0052$ мм, $d_8 = 0.00059$ мм, $d_9 = 0.0066$ мм, $d_{10} = 0.0367$ мм. На рис. 7 представлена графическая зависимость коэффициента отражения от круговой частоты.

Из графической зависимости, представленной на рис. 7, видно, что диапазон коэффициента отражения не превышает значения $R = 0.716$, полученного при резкой границе раздела двух твердых сред. При разделении переходной зоны на 10 слоев случайной толщины коэффициент отражения в заданном диапазоне частот уменьшается плавно относительно деления переходной зоны на 10 слоев одинаковой толщины.

В статье исследовано взаимодействие упругих волн с переходной зоной на границе слоя. Если пренебрегать задачей определения звукового поля внутри системы и исследовать только внешние параметры, то можно применять более простые методы расчета. Рассмотренный в работе метод, основанный на использовании рекуррентных формул, связывающих амплитуды волн в соседних слоях, был предложен академиком Л. М. Бреховских в [6]. С использованием данного метода расчета были получены входные импедансы слоистой системы и построены частотные зависимости коэффициента отражения от систем, состоящих из 3 и 10 слоев.

В статье рассмотрен случай нормального падения волны давления на модель слоистой струк-

туры. В качестве первого слоя рассматривали углеродистую сталь, а в качестве второго – металлургический шлак. В случае плоского слоя, когда толщина d стремится к 0, граница между сталью и шлаком резкая. Из-за значительной разницы между волновыми сопротивлениями двух сред имеем большое значение коэффициента отражения $R = 0.716$. Переходная зона разделялась на 3 и 10 слоев одинаковой толщины, при этом общая толщина зоны h не менялась. Также был рассмотрен вариант случайной толщины элементарных слоев, при этом общая толщина переходной зоны h оставалась неизменной.

По графическим зависимостям видно, что деление переходного слоя приводит к уменьшению коэффициента отражения в рассматриваемом частотном диапазоне. При делении переходной зоны на 10 слоев было достигнуто значительное уменьшение значения коэффициента отражения падающей волны. Деление на 3 слоя также привело к уменьшению отражающей способности, хоть и незначительному.

Рассмотренный в данной статье импедансный метод применяют для расчета многослойных структур – например, состоящих из слоев на основе звукопоглощающих материалов. Метод находит применение в различных научных областях: в архитектурно-строительной акустике, при создании звуковой и вибрационной защиты, волноводов, согласующих переходных слоев, фильтров продольных или поперечных волн, демпфирующих покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шамаев А. С., Шумилова В. В. Прохождение плоской звуковой волны через слоистый композит с компонентами из упругого и вязкоупругого материалов // Акуст. журн. 2015. Т. 61, № 1. С. 10–20.
2. Оболенцева И. Р., Чичина Т. И. 50 лет исследований сейсмической анизотропии в России // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 10. С. 1452–1470.
3. Губайдуллин Д. А., Федоров Ю. В. Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 162–173.
4. Lee K., Choi B. K., Yoon S. W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water // J. of the Korean Physical Society. 2002. Vol. 40, № 2. P. 256–263.
5. Молотков Л. А., Хило А. Е. Эффективные модели слоистых сред с линейными контактами общего вида // Зап. науч. семинаров ЛОМИ. 1986. Т. 156. С. 148–157.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

A. V. Vagin, A. M. Inyukina
Saint Petersburg Electrotechnical University

DECREASE IN THE REFLECTION COEFFICIENT OF A SOUND WAVE FROM A LAYERED MEDIUM DURING NORMAL INCIDENCE

In the article, the possibility of decreasing the reflection coefficient of a sound pressure wave incident normally on the surface of a layered medium is investigated. To reduce the reflection coefficient of the sound wave, the method of introducing additional layers with the parameters density and speed of sound, which provide a smooth transition from one medium to another with minimal loss of energy for propagation, was chosen. As the investigated model of such a medium, the structure "carbon steel-metallurgical slag" is used, divided into three and ten layers with transition parameters that vary linearly. In the article, the dependences of the reflection coefficient on the circular frequency are constructed for two options for introducing the number of transition layers: three and ten. It is shown that with an increase in the number of transition layers between the media, the sound reflection coefficient decreases.

Reflection coefficient, normal fall, inclined fall, layered medium, transition layer, medium density, sound speed

УДК 504.4.054, 504.064.3

Н. И. Куракина, А. А. Михайлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Картографическое моделирование снежного покрова в технологии геоинформационных систем

Исследованы вопросы картографирования снежного покрова с использованием программы ArcGIS for Desktop и данных космосъемки – снимков со спутника Landsat 8. Разработан алгоритм определения площади снежного покрова с целью оценки риска затопления территории в период половодий. В качестве объекта исследования выбрана река Белая, протекающая по территории республики Башкортостан. Основным источником питания выбранной реки служат осадки, преимущественно снег, что делает особенно важной задачу прогнозирования весенних разливов. Согласно разработанному алгоритму, площадь снежного покрова вычисляется с использованием нормализованного индекса различий снежного покрова NDSI. Проведен сравнительный анализ использования различных индексов. Рассчитаны значения площади снежного покрова по снимкам разных временных периодов, получено процентное соотношение заснеженной области к общей площади территории. Произведена проверка корректности используемого алгоритма вычислений и сделан вывод о возможности использования индексов NDSI и NDVI для анализа изменения снежного покрова по растровым снимкам для оценки риска затопления территории в период половодья.

Снежный покров, спутниковые снимки, индексный анализ, ГИС

Моделирование снежного покрова в большинстве случаев является одним из этапов моделирования гидрологического цикла в целом. Для территорий с редкой сетью наземных снегомерных наблюдений приобретает все большее значение использование спутниковых данных. Ряд характеристик снежного покрова (площадь заснеженности, температура поверхности снега, снегозапас) могут быть с различным уровнем надежности измерены по данным космической съемки. Наиболее надежно по данным космической съемки оценивается площадь заснеженности. Детальный анализ космических снимков позволяет своевременно измерить динамику изменения площади снежного покрова и оценить потенциальную опасность для населенных пунктов и промышленных объектов.

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма оценки площади снежного покрова по космическим снимкам с использованием программы ArcGIS for Desktop для оценки риска затопления территории в периоды половодий.

В качестве объекта исследования выбрана река Белая, протекающая по территории республики Башкортостан. Около 80 % питания реки Белой – это осадки, в основном снег. Соответственно, весенний разлив реки зависит от количества снега в этом районе.

Половодье реки Белой проходит приблизительно с 10 апреля по 28 мая. Во время половодья воды заливают пойму вместе с расположенными на ней полями, лесами и городскими кварталами. Помочь в прогнозировании половодья может анализ площади снежного покрова района реки Белой, в частности оценка изменения количества снега во времени с использованием данных дистанционного зондирования земли.

Индексный анализ ДДЗ. В период весеннего снеготаяния репрезентативность и надежность данных снегомерных съемок снижается, а частота их получения становится недостаточной. В связи с этим возрастает ценность спутниковой информации о заснеженности территории, которая при благоприятных погодных условиях может обнов-

ляться ежедневно. К основным источникам оперативных данных о заснеженности относятся снимки спутника Landsat 8, которые находятся в свободном доступе [1].

Landsat 8 – восьмой спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках программы Landsat, поддерживаемой совместно Геологической службой США (USGS) и Национальным аэрокосмическим агентством (NASA). Landsat 8 осуществляет съемку, используя два набора сенсоров – Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS) с пространственным разрешением 30...100 м в зависимости от диапазона съемки. Временное разрешение – 16 сут.

Назначение спутника – съемка земной поверхности в видимом, ближнем инфракрасном, среднем инфракрасном и тепловом диапазонах спектра. Получаемые снимки – растровые, т. е. состоят из ячеек – пикселей, каждому пикселю соответствует территория площадью 30 × 30 м и информация о количестве отраженного света. Эту информацию можно использовать для вычисления различных индексов изображений.

Различают индексы для оценки почвы, растительности, атмосферы, полезных ископаемых и т. д.

Для подсчета площади снега в работе используется индекс NDSI – нормализованный индекс различий снежного покрова. Индекс NDSI для каждой ячейки растра вычисляется по формуле

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR},$$

где Green – количество зеленого света с длиной волны 0.525...0.6 мкм, отраженного от участка; SWIR – количество коротковолнового света с длиной волны 1.56...1.66 мкм, отраженного от этого же участка. При расчете NDSI также учитывается маска облачности, поскольку облака, как

и снег, хорошо отражают излучение в видимой части спектра и поглощают в инфракрасной.

Пороговое значение индекса NDSI, по которому детектируется снежный покров, рекомендовано принимать равным 0.4 – т. е. пиксель снимка определяется как заснеженная территория, если ему соответствует значение индекса от 0.4 и больше. Этот порог NDSI был проверен разработчиками метода [2]. По данным разработчиков, точность распознавания снежного покрова составляет от 90 до 98 %, в зависимости от сезона года и типа подстилающей поверхности.

Для сравнения результатов используется индекс NDVI – нормализованный вегетационный индекс, который определяет наличие и состояние растительности, а также водные объекты, снег, облака и искусственные материалы [3]. Индекс NDVI вычисляется по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

где NIR – количество инфракрасного света с длиной волны 0.845...0.885 мкм; Red – количество красного света с длиной волны 0.63...0.68 мкм.

Согласно формулам для двух нормализованных индексов их значения лежат в пределах от –1 до 1.

Алгоритм вычисления площади снежного покрова. Алгоритм вычисления в виде схемы представлен на рис 1.

В рабочую область программы ArcGIS for Desktop добавляются снимки зеленого и инфракрасного каналов. При помощи инструмента «Калькулятор растра» по уже известной формуле вычисляется индекс NDSI для каждой ячейки изображения. В результате получаем новое растровое изображение, каждой ячейке которого соответствует используемый индекс [4]. Для снеж-

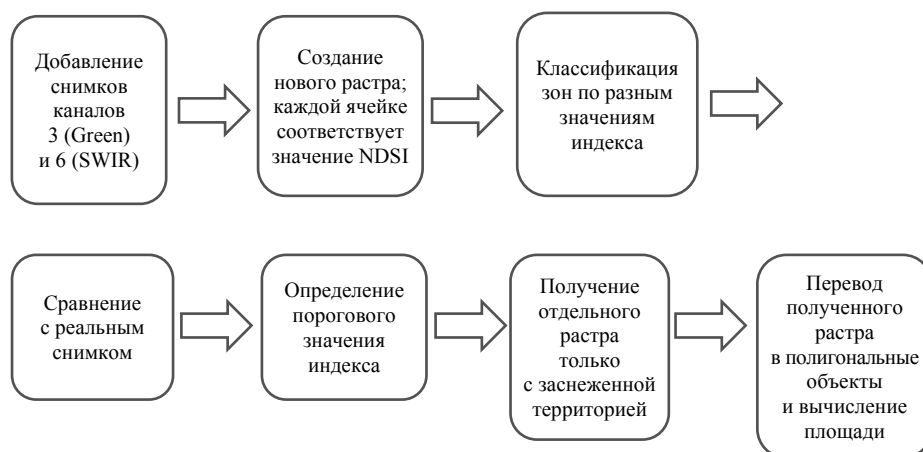


Рис. 1

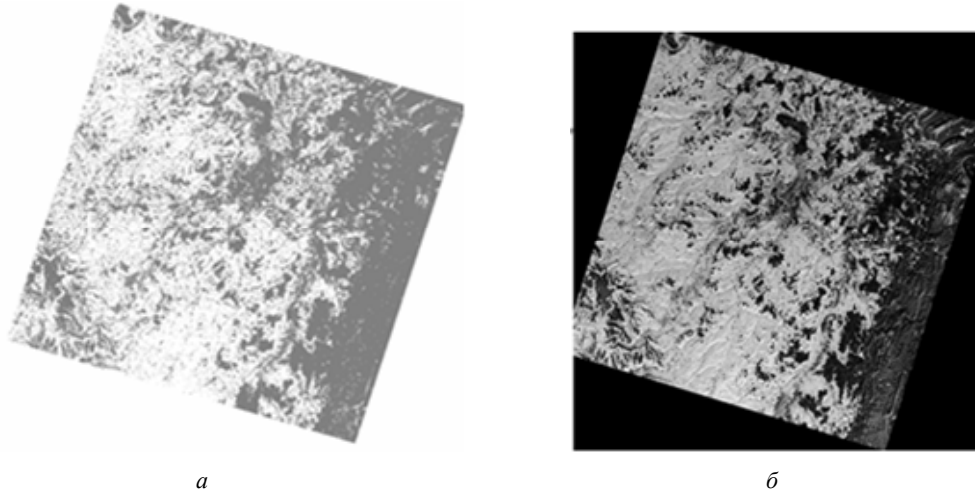


Рис. 2

ного покрова обобщенное пороговое значение индекса NDSI больше или равно 0.4.

В программе ArcGIS for Desktop имеется возможность разными способами классифицировать ячейки в растровом изображении. Если присвоить черный или серый цвет ячейкам, для которых индекс NDSI меньше 0.4, и белый цвет для ячеек с индексом больше или равным 0.4, то изображение получится достаточно наглядным, и его можно сравнить со спутниковым снимком в естественном свете, взятым с сайта. Пороговое значение можно изменить в большую или меньшую сторону, в зависимости от разницы между обработанным и исходным снимками, определяемой визуально. Оба варианта снимка представлены на рис. 2 (*a* – обработанный снимок (NDSI), *б* – реальный снимок).

В результате подбора порогового значения индекса можно получить изображение, наиболее похожее по заснеженности на исходный снимок. После этого для всех пикселей, определенных программой как снег, вычисляется общая площадь – площадь снежного покрова.

При использовании индекса NDSI важна малая облачность, поскольку облака так же отражают излучение в видимой части спектра и поглощают в инфракрасной, как и снег. Поэтому для анализа изменения покрова выбирались снимки с минимальной облачностью (менее 10 %). Информация об облачности для каждого снимка также предоставляется на сайте [5].

Результаты анализа. Для территории реки Белой спутниковые снимки заснеженной территории, подходящие под необходимое значение облачности, встречаются 1–2 раза в год в период с января по март. Были отобраны соответствующие снимки и рассчитана площадь заснеженной территории.

Для проверки корректности полученных результатов была рассчитана общая площадь на снимке. Для этого выбирались все ячейки исходного растрового изображения, и вся выбранная территория переводилась в полигональный объект, для которого вычислялась площадь. Площадь снимка составляет 37 453.5 км². Таким образом, получено процентное соотношение площади снежного покрова S к площади снимка S' в разное время с 2015 до 2018 г. Диаграмма с результатами показана на рис. 3.

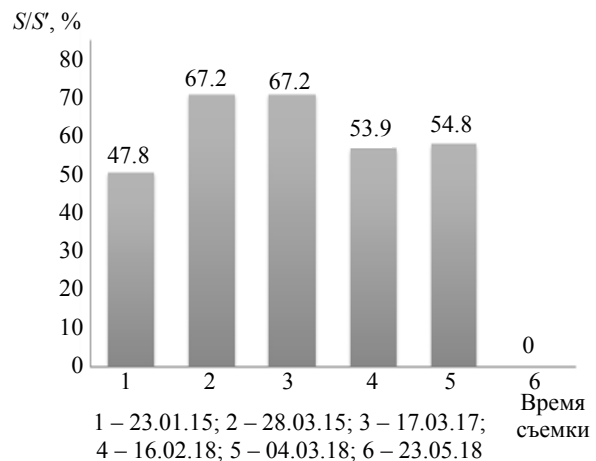


Рис. 3

При обработке снимка от 23.01.2015 снежный покров определялся более корректно при значении индекса NDSI больше 0.3. Для остальных изображений пороговое значение осталось равным 0.4.

Был произведен сравнительный анализ площадей заснеженной территории с использованием двух различных индексов: один и тот же снимок был обработан при помощи нормализованного вегетационного индекса NDVI и NDSI с использованием описанной ранее методики. Разность площадей составила 1275.4 км², что приблизительно

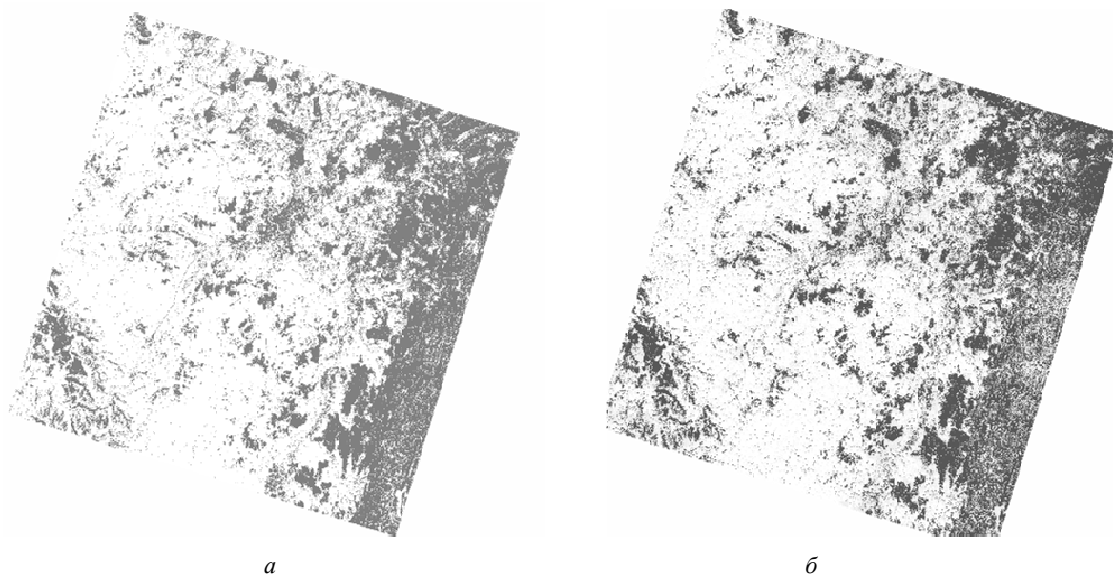


Рис. 4

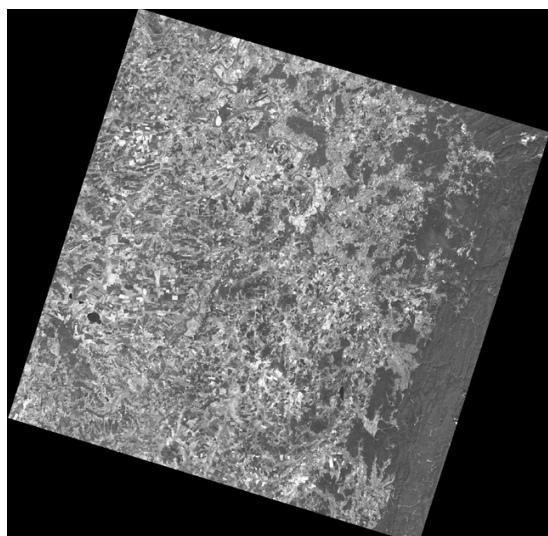


Рис. 5



Рис. 6

Значение индекса NDVI	Предполагаемый объект (при расчете растительности летом)	Определяемый объект (при настоящем расчете)
-1...-0.5	Искусственные материалы	Нет объекта
-0.5...-0.25	Вода	Нет объекта
-0.25...-0.05	Снег и лед	Облака
-0.05...0	Облака	Снег
0...0.025	Открытая почва	Менее заснеженные территории
0.025...0.7	Растительность	Растительность
0.7...1	Искусственные материалы	Нет объекта

составляет 5 % от значения, полученного при вычислении индекса NDSI. Обработанные снимки и вычисленная площадь снежного покрова представлены на рис. 4 (*а* – NDSI ($S = 25\,169.4\text{ км}^2$), *б* – NDVI ($S = 26\,444.8\text{ км}^2$)).

Нормализованный вегетационный индекс NDVI в основном используется для определения территорий с растительностью. Для него также существуют найденные экспериментально диапазоны значений для разных объектов – растительности, водных объ-

ектов и др. В таблице представлены диапазоны значений индекса и вид объектов, распознаваемые в данном диапазоне в случае расчета растительности (летний снимок) и площади снежного покрова (зимний снимок).

В результате использования вегетационного индекса значение площади увеличилось; на снимке были выявлены растительность, заснеженные территории и облака.

Также для проверки корректности используемого алгоритма вычислений была посчитана площадь снежного покрова для летнего снимка снимок территории реки Белая (23 мая 2018 г.) (рис. 5).

При помощи индекса NDSI была вычислена площадь заснеженной территории – 2.92 км². На участке, который был принят за снег, происходит добыча соды предприятием ОАО «Сода» (рис. 6).

Из проделанной работы следует вывод, что индексы NDSI и NDVI можно использовать для анализа изменения снежного покрова по растровым снимкам. В качестве порогового значения

для выделения снежного покрова по индексу NDSI в большинстве случаев следует принимать значение 0.4. Анализ снимков производится с некоторой погрешностью, но значительное изменение количества снега в течение нескольких месяцев может быть диагностировано. В перспективе данные спутниковых снимков Landsat 8 и расчет площади снежного покрова в районе реки Белая при помощи нормализованных индексов NDSI и NDVI можно использовать для прогнозирования весенних половодий и определения территорий, подвергающихся затоплению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снимки со спутника Landsat. URL: <https://libra.developmentseed.org> (дата обращения 19.09.2019).
2. Крутских Н. В., Кравченко И. Ю. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 2. С. 159–168.

3. NDVI – теория и практика. URL: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения 19.09.2019).
4. Куракина Н. И. Геоинформационные системы в экологии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
5. Crane R. G., Anderson M. R. Satellite discrimination of snow/cloud surfaces // Intern. J. of Remote Sensing. 1984. № 5(1). P. 213–223.

N. I. Kurakina, A. A. Mikhaylova
Saint Petersburg Electrotechnical University

CARTOGRAPHIC MODELLING OF SNOW COVER IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM TECHNOLOGY

Contains the issues of snow cover mapping using the ArcGIS for Desktop program and satellite imagery data from Landsat 8. An algorithm for determining the snow cover area was developed with the aim of assessing the risk of flooding during floods. The Belaya River flowing through the territory of the Republic of Bashkortostan was chosen as the object of study. The main source of food for the selected river is precipitation, mainly snow, which makes the task of forecasting spring spills especially important. According to the developed algorithm, the snow cover area is calculated using the normalized difference snow index NDSI. A comparative analysis of the use of various indices. The values of the snow cover area are calculated from the images of different time periods, the percentage ratio of the snow-covered area to the total area of the territory is obtained. The correctness of the calculation algorithm used was verified and a conclusion was drawn on the possibility of using the NDSI and NDVI indices for analyzing changes in snow cover by raster images in order to assess the risk of flooding of the territory during the flood period.

Snow cover, satellite imagery, index analysis, GIS

УДК 004.272

А. В. Гурин, А. А. Пазников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Реализация в модели акторов децентрализованной атомарной рассылки без процедуры выбора лидера

Атомарная рассылка (atomic broadcast) – фундаментальный примитив синхронизации процессов, необходимый для реализации разделяемого состояния в распределенных вычислительных системах (ВС). Для выполнения атомарной рассылки перспективен децентрализованный подход, при котором отсутствует процедура выбора лидера (leaderless). Такой подход позволяет равномерно распределить нагрузку между узлами, обеспечить отказоустойчивость и эффективен в больших масштабах ВС. В настоящее время не существует алгоритмов реализации атомарных рассылок в модели акторов (actor model), которая активно развивается и находит достаточно широкое применение. В отличие от модели передачи сообщений, представленной стандартом MPI, модель акторов реализует динамическое отображение активных объектов (акторов) на потоки и процессы операционной системы. В данной работе в модели акторов реализован децентрализованный алгоритм атомарной рассылки. Высокоуровневая модель акторов позволяет применять созданный инструментарий для построения распределенных приложений широкого спектра. Проведено натурное моделирование на вычислительном кластере. Полученное значение латентности выполнения атомарной рассылки составляет менее 10 мс для подсистем из 20 узлов при отправке 20 запросов в секунду размером 100 байт. В статье приводится описание алгоритма и механизма реагирования на отказы в системе. Алгоритм реализован программно в виде библиотеки для построения распределенных приложений. Созданный программный инструментарий может быть использован для организации отказоустойчивых вычислений в распределенных вычислительных системах, например для реализации репликации данных.

Распределенные системы, консенсус, протокол консенсуса, атомарная рассылка, модель акторов, репликация

Распределенная вычислительная система (ВС) – это множество элементарных машин (ЭМ), взаимодействующих через сеть связи с целью решения сложных задач. Задачи для распределенных ВС представлены в виде параллельных программ, включающих параллельные процессы (потоки).

Под консенсусом (consensus) понимается соглашение между процессами относительно выбираемого значения. Процессы в распределенной ВС используют протокол достижения консенсуса для того, чтобы выбрать одно из значений, которые предложил каждый из процессов. Любой инструментарий для распределенных ВС, включающий поддержку общего состояния для нескольких процессов или необходимость совместного принятия решения о выполнении следующей операции, включает процедуру решения консенсуса.

Алгоритм консенсуса должен учитывать, что в распределенной системе возможны отказы (failures, errors). Процесс или сегмент системы может стать недоступным для остальных процес-

сов в результате программных или аппаратных ошибок (сбоев сетевого оборудования, операционной системы или программы). Алгоритмы консенсуса предлагают различные гарантии относительно устойчивости к той или иной разновидности сбоев. Чтобы определить отказ какого-либо из процессов, используется детектор ошибок (failure detector), который реализует периодическую рассылку сообщений (heartbeat request) процессам, на которые они должны ответить подтверждением (heartbeat response). Если подтверждение не было получено в течение определенного времени, процесс считается отказавшим.

Понятие консенсуса носит фундаментальное значение для параллельного программирования, поскольку консенсус обладает свойством «универсальности» [1]: на базе объекта, реализующего свободный от ожиданий (wait-free) протокол консенсуса для произвольного числа процессов (потоков), могут быть реализованы любые более сложные свободные от ожиданий разделяемые структуры данных [1]–[6].

На практике алгоритмы консенсуса используются для реализации репликации – процесса синхронизации нескольких копий (реплик) заданного объекта. Репликация позволяет повысить отказоустойчивость системы, поскольку если один из процессов отказывает, объект остается доступным для пользователей [7]–[10]. Для репликации необходимо, чтобы копии имели одинаковое состояние и все изменения, внесенные в одну из них, отражались в остальных. Поэтому реплицируемый объект должен соответствовать модели детерминированного конечного автомата [11]: очередное выходное значение детерминированного автомата определяется его исходным состоянием и последовательностью ранее выполненных команд. Несколько копий могут поддерживать одно и то же состояние, если получаемые от клиентов команды выполняются в одном и том же порядке. Именно за обеспечение согласованного порядка получения команд репликами отвечает алгоритм консенсуса. Данная операция может быть реализована с помощью атомарной рассылки (atomic broadcast), которая обладает следующими свойствами [12]:

1. Если сообщение рассылается каким-либо процессом, то все процессы должны получить его.
2. Сообщение не доставляется более одного раза, то есть отсутствуют дубликаты.
3. Если сообщение m было получено одним из корректных (в которых не произошел сбой) процессов, то его также гарантировано получат остальные корректные процессы.
4. Все сообщения упорядочены, т. е. если процесс p_1 получил сообщение m_1 , а затем сообщение m_2 , то и все остальные процессы должны получить сообщение m_1 перед m_2 .

Задачи обеспечения консенсуса и выполнения атомарной рассылки эквивалентны [12].

Отметим, что атомарная рассылка может быть также использована в практике параллельного программирования (например, в стандарте MPI) в качестве коллективного информационного обмена для линеаризуемого (linearizable) [1] обновления состояния распределенных структур данных и обеспечения отказоустойчивости [13]–[15]. Таким образом, данная операция – один из основных компонентов инструментария параллельного программирования распределенных вычислительных систем [16].

Децентрализованный алгоритм атомарной рассылки. В данной работе построен алгоритм

на основе подхода, предложенного в [17]. Основная особенность алгоритма состоит в том, что он не базируется на выборе лидера (leader election) среди процессов [18]–[22]. При таком подходе лидер – это узкое место алгоритма, поскольку нагружен больше, чем остальные процессы. Кроме того, отказ лидера приводит к неспособности системы достижения консенсуса. Используемый децентрализованный подход позволяет распределить нагрузку между серверами равномерно. Кроме того, децентрализация позволяет обеспечить функционирование системы при отказах отдельных процессов и организовать атомарную рассылку в больших масштабах системах (каждый процесс взаимодействует с ограниченным числом других диспетчеров, образующих его локальную окрестность) [23], [24].

Применяется стандартный механизм распознавания ошибок при помощи детектора отказов вместе с механизмом раннего завершения. В данной работе не предполагается появления в системе византийских ошибок (byzantine faults): отказ процесса означает то, что он перестает посылать сообщения и отвечать на запросы.

Для передачи сообщений в рамках используемого подхода применяется оверлейная сеть (overlay network). Параметры графа, ее описывающего, влияют как на надежность алгоритма, так и на его производительность. Значение вершинной связности графа k определяет, сколько процессов должны отказать, чтобы система была разбита на несвязанные между собой подсети. Реберная связность λ отражает возможные ошибки в коммутационном оборудовании. Как вершинная, так и реберная связности ограничены степенью d графа G : $k \leq \lambda \leq d(G)$ [25]. Если $k = \lambda = d(G)$, то граф G считается оптимально связным.

В рамках используемого подхода каждое сообщение рассылается всем процессам сети, соответственно диаметр графа $D(G)$ влияет на время реализации пересылок. В свою очередь, диаметр ошибки $D_e(G, f)$ определяет, насколько сильно отказы серверов влияют на продолжительность рассылки [26].

Для организации рассылки применяется биномиальный граф (Binomial Graph, BMG) [27] и граф $G_s(n, d)$ [28]. Данные графы – субоптимально связанные и имеют достаточно небольшой диаметр, однако диаметр $G_s(n, d)$ незначительно изменяется при наличии отказов отдельных процессов.

BMG (рис. 1) – это граф, состоящий из n вершин, в котором два процесса p_i соединены, если хотя бы для одного из $0 \leq l \leq \lfloor \log_2 n \rfloor$ справедливо любое из следующих условий:

$$i = j + 2^l \pmod{n};$$

$$i = n + j - 2^l \pmod{n}.$$

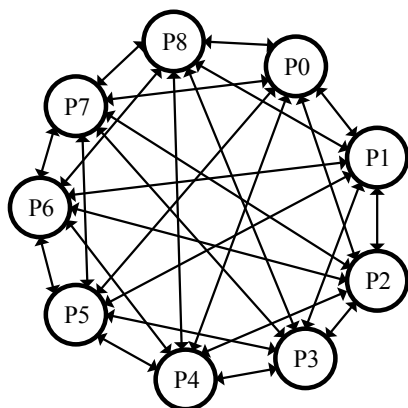


Рис. 1

Связность графа BMG, а значит, и надежность построенной на его основе системы определяется количеством его вершин, при этом предлагаемый уровень надежности чаще всего либо чрезмерен, либо недостаточен [17]. В реальной системе рекомендуется использовать $G_s(n, d)$ – граф со степенью d и количеством вершин n , который позволяет подбирать необходимый уровень надежности (изменяя параметр d); кроме того, при выполнении условия $n \leq d^3 + d$, граф имеет квазимиимальный диаметр т. е. диаметр максимум на единицу больше, чем нижняя граница $\lceil \log_d(n(d-1) + d) \rceil - 1$ [28]. Поскольку BMG построить проще, при дальнейшем разборе алгоритма будем использовать именно его, однако разработанный инструментарий предоставляет возможность использования обоих графов.

Для отслеживания отказавших процессов и исключения их из списка ожидания сообщений в алгоритме используется механизм раннего завершения. Для завершения одной итерации алгоритма процессы должны разослать свое сообщение и получить сообщения от всех остальных процессов. Каждый сервер обрабатывает полученные уведомления от детекторов ошибок и определяет, от каких процессов можно не дожидаться сообщений. Отказавший процесс мог успеть послать свое сообщение соседним процессам (согласно топологии) – в таком случае это сообщение все еще можно атомарно разослать.

Для отслеживания возможных владельцев сообщения каждый сервер хранит массив графов g ,

по одному на каждый процесс системы. Как только детектор отказов определяет процесс как отказавший, коммуникация с ним прекращается, а всем соседям отправляется уведомление. Получив уведомление об отказе, другой процесс может быть уверен в том, что у отправителя отсутствует сообщение отказавшего, иначе он отправил бы его до уведомления (порядок получения сообщений для двух конкретных процессов соответствует порядку отправки).

Рис. 2 содержит алгоритм атомарной рассылки, представляющий собой набор процедур, вызываемых в ответ на получение сообщений. В любой момент времени процесс обрабатывает только одно сообщение. Процедура $RECEIVE<ClientMsg>$ описывает данные процесса, которые обрабатываются в последующих процедурах. Счетчик текущего раунда хранится в переменной $round$ и инкрементируется, как только процессы завершают атомарную рассылку очередного набора сообщений.

Процедуры обработки получаемых сообщений обозначены как $RECEIVE<Тип_сообщения>$ (*Данные_сообщения*). Полученное от клиента системы сообщение передается в функцию $RECEIVE<ClientMsg>$. Сообщение помещается в очередь и, если в текущем раунде процесс не отправлял свое сообщение, рассылается остальным при помощи $SENDMYMSG$.

Функция $SENDMYMSG$ отправляет сообщение m из очереди процесса. Если очередь пуста, то будет отправлено сообщение без данных. Процесс посылает m всем своим соседям (строки 4–6). Вместе с m посылается номер текущего раунда $round$. Отправленное сообщение помещается во множество сообщений M , полученных в текущем раунде.

Функция $RECEIVE<Msg>$ вызывается в ответ на получение сообщения m_s от другого процесса. Существует вероятность, что процесс получит либо устаревшее сообщение m_s из прошлого раунда, либо m_s от процесса, который уже успел начать следующий раунд. В первом случае сообщение отбрасывается, а во втором его обработка откладывается (строка 3: функция $RECEIVELATER$ помещает сообщение в буфер, из которого оно может быть впоследствии извлечено и снова отправлено на обработку функции $RECEIVE<Msg>$). Если m_s соответствует текущему раунду, то, если оно уже не было получено ранее, оно ретранслируется всем соседям (при этом процесс-отправитель остается прежним – строка 7) и добавляется в M . Граф отслеживания, соответствующий данному сообщению, очищается (строка 10).

Данные процесса	
n – количество серверов; E – множество вершин графа топологии; F – множество уведомлений об отказах; $round$ – номер текущего раунда; M – множество сообщений текущего раунда; $sent$ – флаг отправки сообщения в текущем раунде; $G[n] = \{g_0, \dots, g_{n-1}\}$ – графы отслеживания; $P[n] = \{p_0, \dots, p_{n-1}\}$ – массив процессов системы; $this$ – индекс процесса, на котором запущен алгоритм; Q – очередь сообщений на отправку	
Обработка сообщения от клиента	Обработка сообщения об отказе
m – полученное от клиента сообщение	p_{cr} – отказавший процесс; p_s – процесс, приславший сообщение
1 Receive <ClientMsg> (m) 2 $Q.ENQ(m)$ 3 if ! $sent$ then SENDMyMSG() end if	1 Function RECEIVE<Failure> (p_{cr}) from p_s 2 foreach p_i in E where (p_{this}, p_i) do 3 resend Failure(p_{cr}) to p_i 4 end foreach 5 $F.ADD((p_{cr}, p_s))$ 6 foreach g_i in G do 7 if ! $g_i.CONVER(p_{cr})$ then continue end if 8 if ! $g_i.HASCH(p_{cr})$ then 9 $Qr.ENQ(p_{cr})$ 10 foreach (p_{cr}, p_k) in E do 11 if $p_k \neq p_s$ and $p_k \neq p_i$ then 12 $Qr.ENQ((p_{cr}, p_k))$ 13 end if 14 end foreach 15 while (! $Qr.ISEMPTY()$) do 16 (p_x, p_y) = $Qr.DEQ()$ 17 $g_i.ADDVER(p_y)$ 18 $g_i.ADDEDG(p_x, p_y)$ 19 foreach $\{p_y, *\}$ in F do 20 foreach p_z in E where (p_y, p_z) do 21 if $p_z \neq p_{this}$ and ! $F.CONTAINS((p_y, p_z))$ then 22 $Qr.ENQ((p_y, p_z))$ 23 end if 24 end foreach 25 end foreach 26 end while 27 else if $g_i.HASCH(p_{cr})$ then 28 $g_i.REMEDGE((p_{cr}, p_s))$ 29 if ! $g_i.HASPAR(p_s)$ then $g_i.REMVER(p_s)$ end if 30 if ! $g_i.HASCH(p_{cr})$ then 31 $Qt.ENQ(p_{cr})$ 32 while (! $Qt.ISEMPTY()$) then 33 $v = Qt.DEQ()$ 34 foreach v_k in g_i do 35 $g_i.REMEDGE((v_k, v))$ 36 if (! $g_i.HASCH(v_k)$) then $Qt.ENQ(v_k)$ 37 end foreach 38 $g_i.REMVER(v)$ 39 end while 40 end if 41 foreach v_k in g_i where ! $g_i.PATHEXISTS(v_k, p_i)$ do 42 $g_i.REMVER(v_k)$ 43 $g_i.REMEDGE((v_k, *))$ 44 end foreach 45 end if 46 if $g_i.CONTAINSONLYVERTEXES(F)$ then 47 $g_i.CLEAR()$ 48 end if 49 end foreach 50 TESTTERM()
Отправка сообщения	
1 Function SENDMyMSG() 2 if $Q.ISEMPTY()$ then $Q.ENQ(EMPTY_MSG)$ end if 3 $m = Q.DEQ()$ 4 foreach p_i in E where (p_{this}, p_i) do 5 send Msg($m, round$) to p_i 6 end foreach 7 $M.ADD(m)$ 8 $sent = true$	
Обработка сообщения от процесса	
m_s – сообщение; r – раунд, в который было послано сообщение; p_s – процесс, приславший сообщение	
1 Function RECEIVE<Msg> (m_s, r) from p_s 2 if $r < round$ then return end if 3 if $r > round$ then RECLATER(m_s, r, p_s) end if 4 if ! $sent$ then SENDMyMSG() end if 5 if ! $M.CONTAINS(m_s)$ then 6 foreach p_i in E where (p_{this}, p_i) { 7 resend MSG(m_s, r) to p_i 8 end foreach 9 $M.ADD(m_s)$ 10 $g_s.CLEAR()$ 11 end if 12 TESTTERM()	
Проверка завершения раунда	
1 Function TESTTERM() 2 if $G.ISEMPTY()$ then 3 $SORT(M)$ 4 foreach m_i in M do 5 deliver (m_i) 6 end foreach 7 foreach p_i where ! $M.Contains(m_i)$ do 8 $G.Remove(g_i)$ 9 end foreach 10 foreach (p_{cr}, p_s) in F where $G.CONTAINS(g_{cr})$ do 11 RESEND Failure(p_{crash}, p_s) 12 end foreach 13 foreach g_i in G do 14 $g_i.RESET()$ 15 end foreach 16 $round = round + 1$ 17 $sent = false$ 18 $M.CLEAR()$ 19 $RECEIVEALLPOSTPONED()$ 20 end if	

Рис. 2

Функция TESTTERM реализует проверку, завершился ли текущий раунд атомарной рассылки сообщений. Раунд завершен, если все графы отслеживания пусты (строка 2), т. е. получены сообщения от всех корректных процессов. В этом случае M сортируется, после чего обрабатываются необходимым образом (строка 5). Далее из g удаляются графы процессов, от которых сообщение не было получено в текущем раунде (строки 7–9), и заново рассылаются уведомления об ошибках, если указанный в них отказавший процесс все еще присутствует в массиве g (строки 10–12). Затем графы отслеживания заново инициализируются, увеличивается номер раунда, очищается M , а отложенные ранее (строка 16) сообщения снова отправляются на обработку.

Процедура RECEIVE<Failure> вызывается в ответ на получение уведомления об отказе процесса p_{cr} , которое прислал p_s . Все полученные уведомления ретранслируются соседям и помещаются во множество F . После этого в каждый из графов отслеживания вносятся изменения, отражающие возникший отказ. Существует три сценария при внесении изменений в очередную граф g_i .

Первый сценарий – граф g_i не содержит вершины, соответствующей отказавшему процессу. В этом случае не требуется каких-либо действий (строка 7).

Второй сценарий – граф g_i содержит вершину отказавшего процесса p_{cr} , у которой нет потомков, т. е. она еще не была развернута (строки 8–27). В этом случае данная вершина разворачивается. Для этого создается очередь Q_r , в которую помещаются дуги соседей соответствующего процесса (за исключением процесса, который прислал уведомление, и процесса, сообщение которого отслеживается в данном графе g_i – строка 11). Затем выполняется цикл, который завершается, как только очередь станет пустой. На каждой итерации извлекается очередная дуга (p_x, p_y) из очереди и добавляется вместе с вершиной p_y , если ее еще там нет, в граф. При этом если процесс p_y ранее упоминался в уведомлениях об ошибках (строка 19, * означает любой процесс), он также разворачивается, добавляется в очередь (за исключением дуг, которые присутствуют в F – строка 21).

Третий сценарий – граф содержит вершину отказавшего процесса, у которой есть потомки, т. е. она уже была развернута (строки 27–45). В этом случае удаляется дуга (p_{cr}, p_s) и вершина p_s (если у

нее не осталось родителей). Если после удаления вершина p_{cr} осталась без потомков, то ее необходимо также удалить, как и ее родителей, если у них также перед удалением осталось по одному потомку. Данная операция реализуется в цикле, в котором такие родители помещаются в очередь, а затем удаляются (строки 32–39). В конце удаляются висячие вершины, у которых не существует пути до вершины p_i , т. е. процесса, чье сообщение отслеживается (строки 41–44). Если граф содержит только вершины, соответствующие процессам, об отказе которых уже известно, то он очищается.

Алгоритм атомарной рассылки в модели акторов. Модель акторов в библиотеке Akka.NET. Модель акторов – модель параллельных вычислений, строящаяся вокруг понятия «актор», обозначающего универсальный примитив параллельного выполнения операций. В качестве инструмента реализации алгоритма в данной работе была выбрана библиотека Akka.NET [29], [30], реализующая данную модель. Akka.NET обеспечивает масштабируемую, распределенную обработку данных и в настоящее время интенсивно развивается. В распределенном приложении, построенном при помощи Akka.NET, основным блоком служит актер, который поддерживает операции отправки-получения сообщений другим актерам. В ответ на получение сообщения актер может выполнить какую-либо операцию. Состояние актора изолировано от остальных акторов и может изменяться только им самим в ответ на получаемые сообщения. Каждый актер содержит «почтовый ящик» (Mailbox) – буфер, в который помещаются полученные сообщения, которые затем обрабатываются в порядке очереди. Все акторы выполняются в отдельных потоках, однако каждый из них обрабатывает только одно сообщение в каждый момент времени. Определенного порядка, в котором сообщения будут помещены в Mailbox, нет, однако если рассматривать коммуникацию между двумя произвольными актерами, то сообщения должны быть получены в том же порядке, в каком они были посланы.

Группа акторов, разделяющих общую конфигурацию, объединяются в систему акторов. Актеры в такой системе формируют иерархию. Они могут создавать других акторов, чтобы делегировать им задачи. На вершине иерархии находится корневой актер (/) с двумя потомками: /user и /system. Актер /user – это родитель всех создаваемых пользователем Akka.NET акторов, стартовая точка для разработчиков приложения.

Akka.Remote позволяет разворачивать системы акторов на нескольких вычислительных узлах ВС. Идентифицировать актор можно при помощи уникального адреса, формируемого аналогично URL.

Система акторов создается посредством вызова метода ActorSystem.Create(name, config), в который передается имя и, при необходимости, объект конфигурации. Тип актора объявляется при помощи наследования от класса ReceiveActor. Создать экземпляр актора можно при помощи вызова метода ActorOf<Тип_Актора> на объекте системы акторов или внутри определения класса актора на унаследованном от ReceiveActor свойстве Context. Поведение актора описывается посредством вызова методов Receive<T>(func), где T – тип получаемого сообщения, func – функция, которая будет вызвана в ответ на получение сообщения. Внутри обработчика func доступно свойство для идентификации отправителя – Sender. Тип сообщения может быть любым, однако его необходимо сделать неизменяемым. Функции Receive для всех необходимых типов сообщений можно вызвать в конструкторе класса актора, однако если набор получаемых сообщений и реакций на них может изменяться, каждый из наборов определяется в отдельных методах, которые необходимо передавать в метод Become(method), в те моменты, когда поведение актора должно быть изменено.

Если актор в данный момент не может обработать определенное сообщение, есть возможность поместить его в специальный буфер – Stash, из которого оно может быть извлечено и снова помещено в Mailbox позже.

Сообщение может быть отправлено одним из трех методов: Tell, Forward и Ask, на объекте, реализующем интерфейс IActorRef, который представляет актор-получатель. Такой объект актор может получить, создав актор (через Context или ActorSystem) либо указав его адресу объекту ActorSelection, который впоследствии попытается связаться с актором по указанному адресу и вернет объект IActorRef. Методы Tell и Forward являются неблокирующими, они посылают сообщение другому актору, не дожидаясь ответа и завершаясь немедленно. Метод Forward отличается тем, что в качестве отправителя сообщения указывается содержимое свойства Sender в текущем контексте, т. е. даже если сообщение будет передано через несколько промежуточных акторов, в нем всегда будет храниться информация об акторе, который изначально отправил данное сообщение. Метод Ask – блокирующий, он реализует ожидание ответа от получателя.

Отследить возникновение отказов в системе можно при помощи вызова метода Context.Watch(IActorRef ref). В случае, если в дальнейшем указанный актор перестает отвечать на запросы обнаружения отказа (heartbeats, выполняются автоматически компонентом Akka.Remote), следящий актор получает сообщение Terminated с информацией об отказе.

Реализация алгоритма атомарной рассылки в модели акторов. Акторы типа ServerActor играют роль процессов (серверов) и реализуют атомарную рассылку сообщения. Для первого старта системы необходимо указать адрес и порт хоста, а также количество процессов, которые необходимо создать. Каждый ServerActor после создания находится в состоянии ожидания инициализации: он ждет получения инициализационного сообщения Messages.InitServer (рис. 3, а). Сообщения других типов откладываются в Stash.

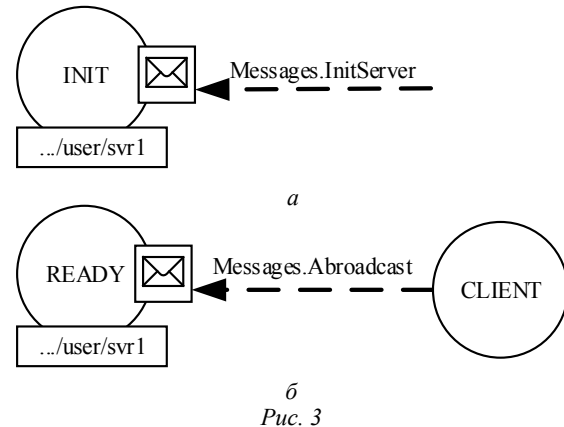


Рис. 3

Сообщения Messages.InitServer содержат данные, необходимые для начала работы алгоритма: массив всех ссылок IActorRef на акторы системы, выбранный граф, количество информации, которое необходимо выводить при помощи актора LogActor, номер раунда, а также информация об узлах. Акторы вычисляют граф топологии (хранится в виде списков смежности), набор своих соседей, а также запускают отслеживание отказов. После инициализации ServerActor переходит в состояние Ready при помощи метода Become().

В состоянии Ready актор выполняет алгоритм, описанный на рис. 2. В системе создается вспомогательный актор, моделирующий работу клиента: периодически он посылает сообщения Messages.Abroadcast (рис. 3, б), которые должны быть разосланы атомарно. Получив такое сообщение, ServerActor помещает его в очередь и отправляет, если он еще этого не делал в текущем раунде. При отправке сообщение помещается в

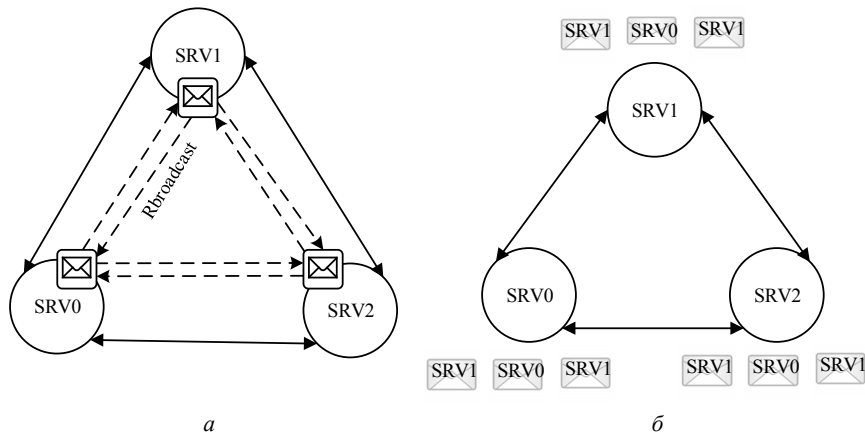


Рис. 4

объект `Messages.Rbroadcast`. Получение этого сообщения запускает функцию, которая проверяет номер раунда сообщения, было ли оно получено ранее (сообщения уникально идентифицируются при помощи `Guid`), помещает его в массив `M`, ретранслирует соседям, а также посылает свое собственное сообщение, если это не было сделано в данном раунде (рис. 4, а). Функция `TestTerm` вызывается для проверки завершения рассылки. Если она завершается успешно, то сообщения сортируются при помощи `Guid` и доставляются в одинаковом порядке всеми серверами (рис. 4, б), после чего начинается новый раунд рассылки, если очередь сообщений не пуста.

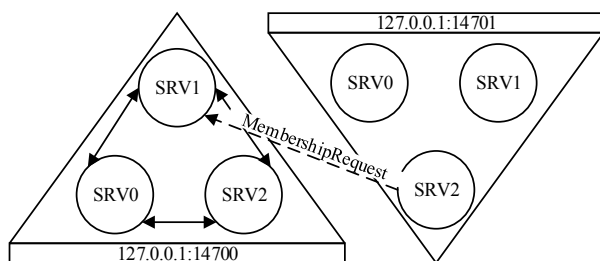


Рис. 5

Сообщение `Terminated` считается полученным, как только один из акторов перестает отвечать на запросы. В ответ на получение `Terminated` сообщение ретранслируется и изменяется массив графов отслеживания.

Запрос рассылается атомарно (рис. 5) в ближайшем раунде, после чего в функции `CheckTermination` каждый актор повторно формирует топологию. Затем начинается новый раунд, рассылаются сообщения всех акторов, после чего специальному актору `ACK`, развернутому на желаемом добавиться узле, посылается подтверждение с полной информацией о системе, которую можно использовать для инициализации акторов этого узла (рис. 6, а). Как только добавленные акторы инициализируются, они смогут закончить раунд посылкой своих сообщений, и система продолжит работать в обычном режиме (рис. 6, б).

Результаты моделирования. Для анализа эффективности было выполнено моделирование разработанного алгоритма на вычислительном кластере информационно-вычислительного центра Новосибирского национального исследовательского государственного университета. Про-

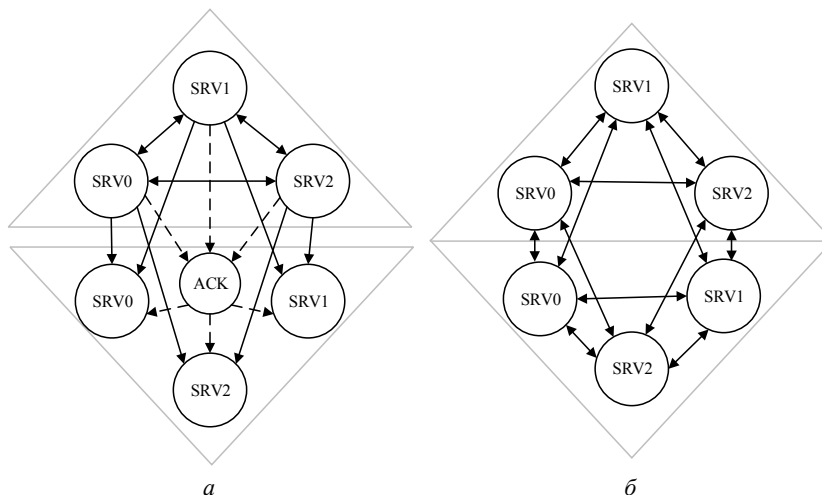


Рис. 6

водилось два эксперимента – для ВС с общей памятью и ВС с распределенной памятью. Для моделирования на ВС с распределенной памятью использовался кластер, укомплектованный 48 узлами HP BL2 × 220с G6, каждый из которых содержит 4 8-ядерных процессора Intel Xeon E5540, коммуникационная сеть Infiniband 4x QDR. В качестве ВС с общей памятью использовался вычислительный узел на базе HP XL230a Gen9, укомплектованный двумя 12-ядерными процессорами Intel Xeon E5-2680v3 и 192 Гбайт памяти. В качестве показателя эффективности алгоритма использовалась средняя латентность – время выполнения атомарной рассылки.

На рис. 7 представлены значения латентности до момента соглашения серверов (завершение атомарной рассылки) при посылке 20 запросов с частотой 100 байт/с с использованием топологий на основе биномиального графа и графа G_S для ВС на основе общей и распределенной памяти. Для системы с распределенной памятью при увеличении числа серверов существенно возрастает время синхронизации. Это объясняется увеличением накладных расходов при выполнении информационного обмена с использованием межузловой сети связи. Граф G_S характеризуется меньшей латентностью по сравнению с биномиальным графом, по-

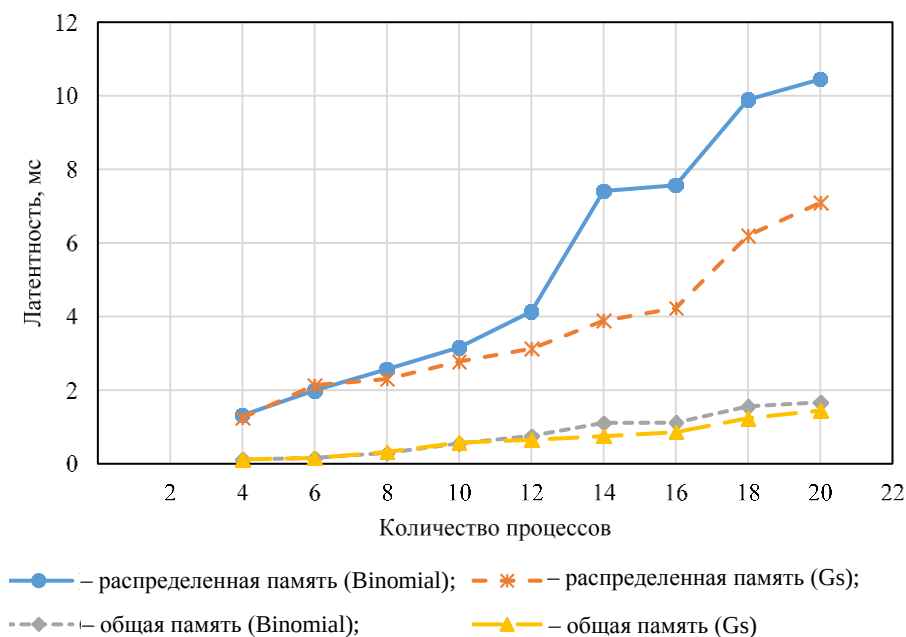


Рис. 7

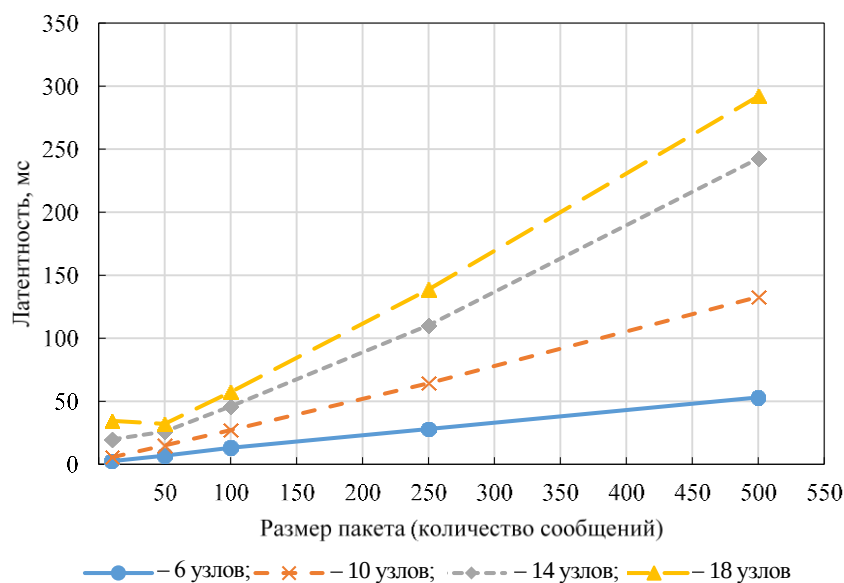


Рис. 8

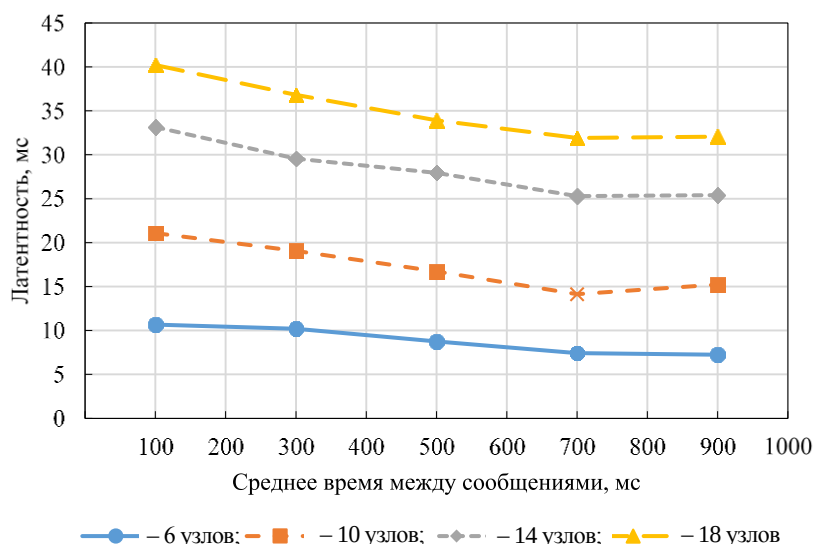


Рис. 9

скольку он субоптимально связный и обладает меньшим диаметром.

На рис. 8 представлены задержки в зависимости от размеров пакетов, в которые упаковываются полученные сообщения от клиентов. Время выполнения алгоритма атомарной рассылки увеличивается с ростом размера данных. Это объясняется увеличением времени выполнения передачи данных. Особенно это характерно для подсистем с большим количеством узлов. На рис. 9 представлена зависимость задержки относительно частоты получения сообщений от клиентов. Пока алгоритм успевает завершить раунд до получения очередной порции сообщений, задержки сопоставимы. В противном случае сообщения накапливаются в буфере, пока тот не будет переполнен.

В данной работе в модели акторов был разработан алгоритм атомарной рассылки без процеду-

ры выбора лидера. Алгоритм программно реализован с помощью пакета для создания распределенных приложений Akka.NET. Проведены эксперименты на вычислительных системах с общей и распределенной памятью, показавшие, что алгоритм характеризуется приемлемым уровнем масштабирования. В качестве топологии системы рекомендуется использовать граф G_S . Созданный инструментарий можно использовать в качестве основы для построения распределенных приложений в вычислительных системах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00784 и при поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (проект СП-4971.2018.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herlihy M., Shavit N. The art of multiprocessor programming. Morgan Kaufmann, 2011. 539 p.
2. Pазников А., Шичкина Ю. Algorithms for optimization of processor and memory affinity for remote core locking synchronization in multithreaded applications // Information. 2018. Vol. 9. № 1. P. 1–12.
3. Аненков, А. Д., Пазников А. А. Алгоритмы оптимизации масштабируемого потокобезопасного пула на основе распределяющих деревьев для многоядерных вычислительных систем // Вестн. Томск. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 39. С. 73–84.
4. Tabakov A., Pазников A. Algorithms for optimization of relaxed concurrent priority queues in multicore systems // Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, 2019. P. 360–365.
5. Смирнов В. А., Омельниченко А. Р., Пазников А. А. Алгоритмы реализации потокобезопасных ассоциативных массивов на основе транзакционной памяти // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 1. С. 12–18.
6. Табаков А. В., Пазников А. А. Алгоритмы оптимизации потокобезопасных очередей с приоритетом на основе ослабленной семантики выполнения операций // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 10. С. 42–49.
7. Burrows M. The Chubby lock service for loosely-coupled distributed systems // Proc. of the 7th symposium on Operating systems design and implementation. Seattle. 2006. P. 335–350.
8. Hunt P., Konar M., Junqueira F. P. ZooKeeper: wait-free coordination for internet-scale systems // Proc. of the 2010 USENIX conf. on USENIX annual technical conference. Boston. 2010. P. 145–158.

9. Windows azure storage: A highly available cloud storage service with strong consistency / B. Calder, J. Wang, A. Ogus, N. Nilakantan // Proc. of the 23rd ACM Symposium on Operating Systems Principles. Cascais, 2011. P. 143–157.
10. Spanner: Google's globally-distributed database / J. C. Corbett, J. Dean, M. Epstein, A. Fikes // Proc. of the 10th USENIX conf. on Operating Systems Design and Implementation, Hollywood. 2012. P. 251–264.
11. Schneider F. B. Implementing fault-tolerant services using the state machine approach: a tutorial // ACM Computing Surveys (CSUR). 1990. Vol. 22, № 4. P. 299–319.
12. Défago X., Schiper A., Urbán P. Total order broadcast and multicast algorithms: Taxonomy and survey // ACM Computing Surveys (CSUR). 2004. T. 36, № 4. P. 372–421.
13. Adaptive barrier algorithm in MPI based on analytical evaluations for communication time in the LogP model of parallel computation / V. Zharikov, A. Paznikov, K. Pavsky, V. Pavsky // Proc. Of the Intern. Multi-conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Far East Con-2018). Vladivostok. 2018. P. 1–5.
14. Жариков В. В., Пазников А. А. Адаптивный алгоритм барьерной синхронизации в стандарте MPI на основе модели параллельных вычислений LogP // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 4. С. 26–32.
15. Курносов М. Г. Алгоритмы трансляционно-циклических информационных обменов в иерархических распределенных вычислительных системах // Вестн. комп. и информац. технол. 2011. № 5. С. 27–34.
16. Масштабируемый инструментальный параллельного мультипрограммирования пространственно-распределенных вычислительных систем / В. Г. Хорошевский, М. Г. Курносов, С. Н. Мамоиленко, К. В. Павский, А. В. Ефимов, А. А. Пазников, Е. Н. Перышкова // Вестн. СибГУТИ. 2011. № 4. С. 3–19.
17. Poke M., Hoefler T., Glass C. W. AllConcur: Leaderless concurrent atomic broadcast // Proc. of the 26th Intern. Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing, Washington. 2017. P. 205–218.
18. Ring Paxos: A high-throughput atomic broadcast protocol / P. J. Marandi, M. Primi, N. Schiper, F. Pedone // Proc. of the 2010 IEEE/IFIP Int. Conf. on Dependable Systems and Networks. Chicago. 2010. P. 527–536.
19. Ongaro D., Ousterhout J. In search of an understandable consensus algorithm // Proc. of the 2014 USENIX conf. on USENIX Annual Technical Conf. Philadelphia, 2014. P. 305–320.
20. Lamport L. The part-time parliament // ACM Transactions on Computer Systems (TOCS). 1998. Vol. 16, № 2. P. 133–169.
21. Lamport L. Paxos made simple // ACM SIGACT News. 2001. Vol. 32, № 4. P. 18–25.
22. Junqueira F. P., Reed B. C., Serafini M. Zab: High-performance broadcast for primary-backup systems // Proc. of the 2011 IEEE/IFIP 41st Intern. Conf. on Dependable Systems & Networks. Washington, 2011. P. 245–256.
23. Kurnosov M. G., Paznikov A. A. Efficiency analysis of decentralized grid scheduling with job migration and replication // Proc. of ACM Intern. Conf. on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM/ICUIMC). Kota Kinabalu. 2013. P. 1–7.
24. Курносов М. Г., Пазников А. А. Децентрализованные алгоритмы диспетчеризации пространственно-распределенных вычислительных систем // Вестн. ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 1(18). P. 133–143.
25. Dekker A. H., Colbert B. D. Network robustness and graph topology // Proc. of the 27th Australasian conf. on Computer science, Dunedin, 2004. P. 359–368.
26. Krishnamoorthy M. S., Krishnamurthy B. Fault diameter of interconnection networks // Computers & Mathematics with Applications. 1987. Vol. 13, № 5–6. P. 577–582.
27. Dongarra J., Bosilca G., Angskun T. A Scalable and fault-tolerant logical network topology // Proc. 5th Intern. Conf. on Parallel and Distributed Processing and Applications, Niagara Falls. 2007. P. 471–482.
28. Soneoka T., Imase M., Manabe Y. Design of a d-connected digraph with a minimum number of edges and a quasiminimal diameter // Discrete Applied Mathematics. 1990. Vol. 27, № 3. P. 255–265.
29. Maksimovic Z. Akka.NET succinctly. Syncfusion, 2018. 121 p.
30. Brown A. Reactive applications with Akka.NET. Manning, 2019. 264 p.

A. V. Gurin, A. A. Paznikov
Saint Petersburg Electrotechnical University

ALGORITHM FOR CHOOSING LOCAL NEIGHBOURHOODS OF DECENTRALIZED SCHEDULERS IN GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS

Atomic broadcast is one of the fundamental synchronization primitives for organizing shared state (consensus) in distributed systems. The promising way for implementing atomic broadcast is decentralized approach, which doesn't involve leader election procedure. Such approach distributes the workload uniformly among the processes, allows robustness and supports large-scale systems. Currently, there are no algorithms for atomic broadcast in actor model, which is one of the most actively developing and is widely used today. In this work, we design decentralized algorithm of atomic broadcast in the actor model. In contrast to message passing model (message passing interface, MPI) actor model implements dynamical mapping of active entity (actor) to the threads and processes of operating system. High-level actor model allows to use developed tools for wide range of distributed applications. We have done experiments on computer cluster. The obtained latency for atomic broadcast was less than 10 ms for the subsystem of 20 nodes and broadcasting 20 requests of 100 bytes per second. In this paper we describe the developed algorithm and the scheme for resolving system failures. The algorithm is implemented as a software library and may be used for fault-tolerant computing in distributed computer systems, for example, for implementing data replication.

Distributed systems, consensus, consensus protocol, atomic broadcast, actor, actor model, replication

УДК 004

В. С. Мельник

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Многопоточная маршрутизация в автоматизированной системе учета конечных нод распределенного кластера

Изложено описание подхода к проектированию географически распределенной системы, в которой используется многопоточная маршрутизация. Данный механизм позволяет повысить отказоустойчивость проектируемой системы в целом за счет использования более одного канала связи между конечными нодами.

Помимо решения задачи повышения надежности в статье изложена методика, позволяющая выполнять балансировку ресурсов, задействуя все имеющиеся каналы связи.

Целью проведенных исследований служит разработка комплексного решения по проектированию инфраструктуры передачи непрерывного потока данных несколькими маршрутами, которые позволяют обеспечить отказоустойчивость и разделить нагрузку между собой, позволяя использовать эти же маршруты для административных целей, например для мониторинга системы и отслеживания критических ситуаций, а также для управления имеющимися нодами.

В предлагаемой схеме проектирования предлагается обеспечивать отказоустойчивость географически распределенной системы так, чтобы каждое из цепи сообщений выступало в качестве независимой единицы компьютерной системы. В результатах работы проведен анализ различных вариантов подключения системы с учетом вероятности выхода из строя каждого из независимых звеньев.

Проектирование сетевой инфраструктуры, отказоустойчивость, надежность, резервирование, балансировка нагрузки, маршрутизация, распределенные системы, кластерные системы

В настоящей статье рассматривается задача проектирования сетевой инфраструктуры с резервированием каналов связи, соединяющих конечные узлы кластерной системы записи потокового видео. Также решается задача обеспечения многопоточной маршрутизации для алгоритмов искусственного интеллекта, описанных ранее [1]. Такая система должна непрерывно записывать видеопоток, поступающий с вещательного сервера. По закону Российской Федерации (Ст. 34 «О хранении материалов радио- и телепередач») телекомпании должны хранить запись эфира за последний месяц. В статье помимо решения основного стека задач – резервирования и балансировки каналов связи, также предлагается и решение косвенной задачи – запись эфира с вещательных серверов во время проведения технических работ на магистральных линиях связи.

Сам по себе сервис записи потокового видео с серверов должен строиться таким образом, чтобы в случае выхода из строя какого-либо отдельного компонента не произошел крах системы записи в целом [2].

На текущий момент времени стремление повысить функциональность систем значительно опережает текущие темпы развития имеющихся методов повышения надежности. В данной ситуации одним из наиболее действенных средств защиты от краха системы является построение нескольких маршрутов до конечной машины. Стоит отметить, что маршруты должны быть построены таким образом, чтобы при нарушении работоспособности одного из них второй продолжал бы работать.

Имеется два подхода для обеспечения отказоустойчивости системы. Первый – увеличение надежности компонентов конечных элементов. В этом случае при отказе одного компонента система продолжит функционировать. Это – последовательный вариант построения кластерной системы.

Вероятность безотказной работы такой системы, состоящей из N конечных элементов, легко рассчитывается по формуле

$$P(t) = p_1(t)p_2(t) \dots p_N(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t).$$

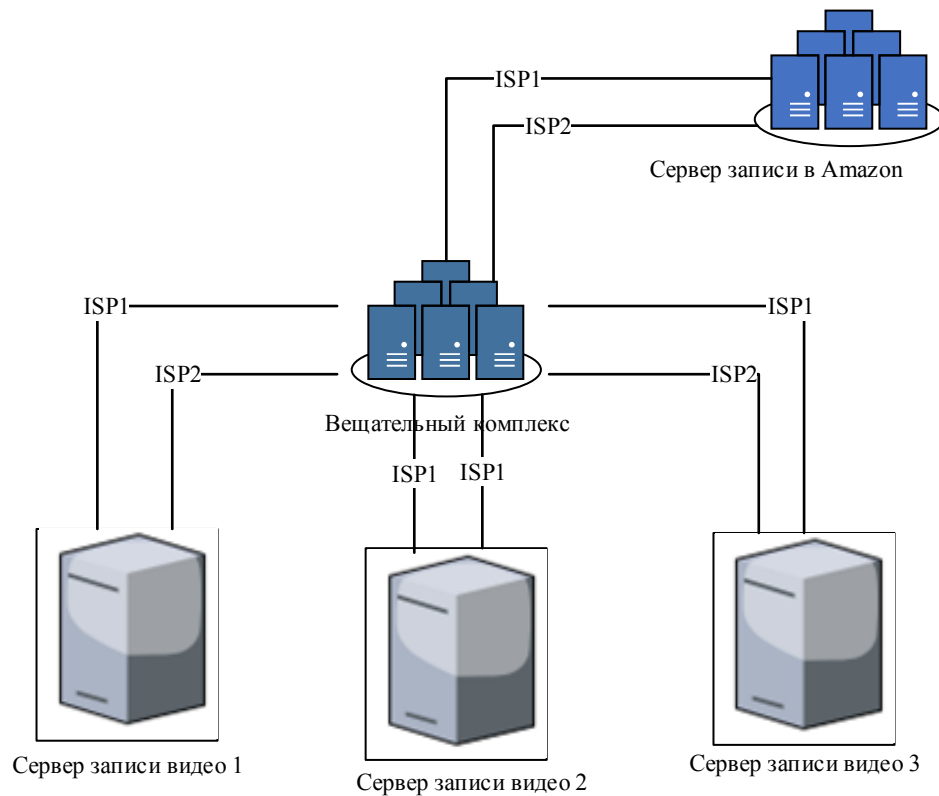


Рис. 1

Второй подход заключается в избыточном резервировании всех критичных компонентов системы таким образом, что при выходе из строя одного из компонентов кластер продолжит функционировать, используя оставшиеся вычислительные мощности. В данном случае работа системы в целом не нарушится. Стоит отметить, что в таком подходе отказ всей системы возможен только в случае выхода из строя всех компонентов. Здесь, как и в первом случае, все узлы кластера подключаются последовательно. Вероятность безотказной работы всего кластера, состоящего из k элементов, высчитывается по формуле

$$P(t) = 1 - q_1(t)q_2(t) \dots q_i(t) \dots q_k(t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - q_i(t)],$$

где $q_i(t)$ – это вероятность выхода из строя i -го элемента системы. Как можно видеть, чем больше количество независимых элементов кластера, тем выше надежность системы в целом.

Общая схема сетевой инфраструктуры изображена на рис. 1.

На схеме весь вещательный комплекс [2] для простоты обозначен единственной пиктограммой, так как в рамках настоящей задачи нет необходимости излишне детализировать эту часть сети. К каждому удаленному серверу приходит не-

сколько провайдеров. Разумеется, передавать данные в открытом виде небезопасно. В связи с этим через каждый канал связи (ISP) происходит подключение с помощью VPN к вещательному комплексу.

В качестве шлюза везде установлен маршрутизатор от MikroTik. Он позволяет обеспечить необходимую для работоспособности коммутационную схему. Для обеспечения отказоустойчивости и балансировки используется инструмент PCC (Per Connection Classifier). Данный инструмент позволяет использовать поля, находящиеся в заголовке IP-адреса: с помощью алгоритма хеширования маршрутизатор преобразует выбранные для работы поля в 32-битное значение. Далее это значение делится на указанный пользователем знаменатель и происходит сравнение остатка от деления. В случае, если остаток равен тому или иному значению (указанному в конфигурации устройства), пакет получает дополнительную пометку и отправляется в один из каналов VPN [3]. Для работы данного инструмента можно выбрать одно из полей пакета:

- адрес источника;
- адрес назначения;
- порт источника;
- порт назначения.

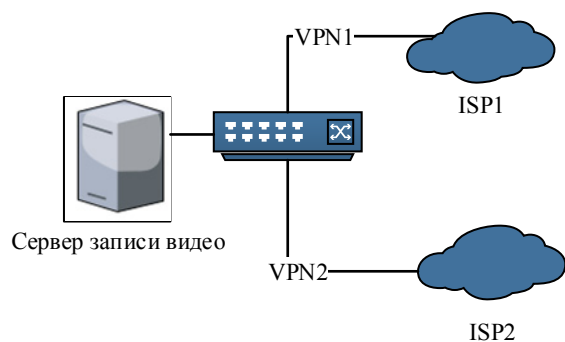


Рис. 2

Иными словами, инструмент позволяет разделить трафик на равные потоки (рис. 2).

В рассматриваемой системе таких потоков всего два, так как вероятность отказа сразу двух каналов связи стремится к нулю. После работы РСС у заголовков пакетов появляется дополнительная метка, которая далее позволит устройству определить дальнейший путь для пакета (рис. 3). В оборудовании от «Mikrotik» эта метка носит наименование Mangle Mark и необходима для добавления к пакету дополнительного поля, которое содержит информацию об очереди, в которой будет обработан пакет. Стоит отметить, что после прохождения очереди и выполнения необходимых действий над пакетом данная метка снимается, а сам пакет принимает исходный вид без каких-либо искажений.

Данный механизм (Mangle Mark) более актуален в случае использования большего количества связующих линий, однако в данной конфигурации системы этого количества более чем достаточно. Инструмент тестируется вместе с реализацией вероятностного алгоритма на большем количестве соединений с привлечением операторов сотовой связи в качестве дополнительных – резервных каналов связи.

Помимо непосредственно инструмента балансировки необходимо дополнительно указать устройству маршруты, с помощью которых отправлять маркированные пакеты. По умолчанию для них выбирается тот же маршрут, по которому пакет пришел. В случае отказа одного из каналов связи маршрутизатор исключит неисправный канал связи из своей таблицы маршрутизации и

будет работать с оставшимися. Для этого и необходимо указать резервный маршрут через альтернативного провайдера. В данном случае используется статическая маршрутизация, которая предполагает нахождение сразу нескольких путей между каждой парой «получатель–источник» заранее. В дальнейшем при работе у маршрутизатора будут одновременно доступны несколько критериев при выборе маршрута для каждого входящего маршрута. Основной – в случае, если оба канала связи работоспособны, и дополнительный – если вся информация отправляется только через одного провайдера.

Многопоточная маршрутизация имеет несколько преимуществ перед обычной – это отсутствие

1) номинальной нагрузки на каждый из каналов связи, что позволяет использовать их под второстепенные задачи (мониторинг оборудования, доступ к видеоматериалам и т. д.);

2) так называемого «холодного» резерва: оба канала связи используются постоянно, что приводит к эффективному разделению имеющихся ресурсов как с технической, так и с финансовой составляющей;

3) времени переключения, которое необходимо для перестройки таблицы маршрутизации устройства. В случае, если таблица маршрутизации велика, ее перестройка может занять некоторое время – тогда пакеты и часть видеопотока будут утеряны.

На основании вышеизложенного стоит подчеркнуть: в настоящей системе используется лавинная многопоточная маршрутизация с использованием всех имеющихся в системе путей. В этом случае пакеты равномерно распределены по всем имеющимся путям. Основа работоспособности системы – методы, которые работают по принципу round robin – по пакетному распределению данных.

При использовании многопоточной маршрутизации основная задача передачи пакетов ложится на пограничный маршрутизатор и заключается в определении маршрутов для передачи маркированных пакетов. Для реализации данной схемы необходимо применить математический аппарат. В данном случае наиболее подходящим

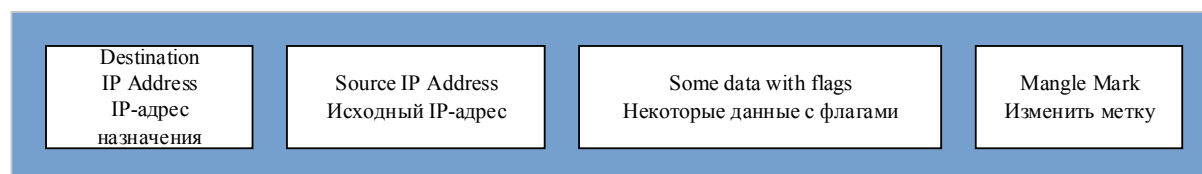


Рис. 3

решением становится аппарат теории графов, так как компьютерную сеть можно представить в виде графа. Основываясь на наработках, полученных в [1], в тестовую версию системы видеозаписи внедрен альтернативный алгоритм, предоставляющий пакетам маршрут, – муравьиный алгоритм.

Муравьиный алгоритм основан на природных процессах. В частности, за основу взята модель поведения колонии муравьев при поиске, когда увеличенным количеством феромона маркируются наиболее удачные пути. Данный алгоритм имеет вероятностную составляющую, что позволяет примерно равными долями отправлять пакеты через имеющиеся каналы связи. Если используются более 2–3 каналов, данный алгоритм позволяет более равномерно распределять нагрузку между ними. Алгоритм определяется следующей формулой:

$$P_{ij} = l_{ij}^q f_{ij}^p / \sum_{k=0}^N l_k^q f_k^p,$$

где P_{ij} – вероятность перехода по выбранному пути; l_{ij} – величина, обратная весу перехода; f_{ij} – количество феромона на переходе; q – величина, определяющая «жадность» алгоритма; p – величина, определяющая «стадность» алгоритма; $p + q = 1$.

Вначале работает только вероятностная составляющая – по выбранному пути отправляется только один муравей из колонии. В том случае, если он находит источник пищи (поиск маршрута успешен), маршрут помечается большим количеством феромона, тем самым привлекая остальных муравьев. Таким образом и получается, что вся колония будет двигаться по наиболее оптимальному маршруту до момента, пока он таковым остается. Каждое из пройденных ребер (маршрутов) помечается величиной, обратно пропорциональной длине пройденного пути:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} k/L, & (i, j) \in P; \\ 0, & (ij) \notin P, \end{cases}$$

где L – длина всего пути; k – изменяемый параметр.

Механизм работы системы автор проверил опытным путем. Эксперимент состоял из двух частей. Первая – проверка работы системы только с одним каналом передачи данных. Вторая – подключение в уже имеющуюся систему нескольких каналов передачи данных один за другим. В таблице наглядно отображены основные параметры, описывающие работоспособность системы в целом. С определенным количеством каналов система максимально нагружалась и эксперимент длился ровно 1 ч. Также фиксированной величиной являются характеристики каналов связи. Каждый обладает пропускной способностью 40 Мбит/с и задержкой передачи в ~10 мс.

Исходя из полученных данных стоит отметить, что оптимальное количество каналов для работы системы – три. Это связано с тем, что можно передавать максимально возможный размер картинки на серверы записи (именно в этом формате происходит изначальное вещание с серверов). Также стоит отметить, что в данном случае показатель загруженности канала составляет всего 35 %, что позволяет использовать каждый из них для административных (управление серверами), сервисных (мониторинг оборудования) целей, а также для передачи данных (выгрузка по запросу необходимого видеоматериала).

В настоящий момент описанный алгоритм реализован автором на программной оболочке маршрутизаторов с помощью использования скриптов, которые позволяют внедрять MikroTik. За основу работы алгоритма берутся интервалы времени, за которые пакет от маршрутизатора-источника попадает на маршрутизатор-приемник. Учитывая, что время передачи меняется, меняется и основной маршрут передачи пакетов, обеспечивая оптимальное время передачи. Разумеется, вся тестовая инфраструктура работает с учетом реальных мощностей установленного оборудования.

Настоящая система имеет централизованную систему управления. Сервер управления располагается в облаке Amazon (AWS) и непрерывно проверяет работоспособность каждого сервера записи и каждого канала до сервера. Результаты

Измеряемый параметр	Результаты испытаний		
	Один канал связи	Два канала связи	Три канала связи
Загруженность каждого из каналов	~98 %	~70 %	~35 %
Потерянные пакеты, шт	534	232	45
Максимальный размер передаваемого изображения, pix	960 × 576	1280 × 720	1920 × 1080
Усредненное количество ошибок на сервере записи	438	217	29

работы собираются в лог-файл, и при необходимости их можно использовать в дальнейшем. Все серверы системы объединены в единую внутреннюю VPN-сеть для защиты передаваемой информации. Расположение центра управления было выбрано не случайно, так как при использовании данного облака вероятность выхода из строя машины крайне мала. Связано это с тем, что серверы, на которых располагается машина, установлены в серверной высокой доступности и время простоя в данных серверных стремится к нулю.

Проверка работоспособности каналов происходит с помощью аг-протокола, чтобы избежать дополнительной нагрузки на инфраструктуру. Каждый маршрутизатор на стороне сервера записи имеет свой внутренний уникальный адрес. В случае недоступности адреса система мониторинга понимает, что один из каналов связи стал недоступен, и также извещает группу инженеров о нарушении работоспособности системы.

Работоспособность сервера записи проверяется скриптом: управляющий сервер с заданной периодичностью пытается подключиться к серверу записи с помощью ssh. В случае, если получен положительный ответ от сервера (вход в систему), то он считается рабочим. В случае, если вход по каким-либо причинам невозможен, проверка происходит еще 3 раза с периодичностью 1 мин между попытками. Если в итоге система выдает отрицательный результат, то сервер записи получает статус «неработоспособный».

В том случае, если в кластере остается лишь один работоспособный сервер записи, включается новая логическая цепочка: запуск резервного (временного) сервера в облаке AWS. Для автоматической установки нового сервера записи сервер управления имеет набор инструкций (bash-скрипт), который содержит информацию об операционной системе, которую необходимо установить; о версиях устанавливаемого программного обеспечения; об адресе, к которому необходимо подключиться через VPN, и многие другие параметры. С момента получения информации о критическом состоянии кластера до полноценного запуска сервера в AWS проходит не более 3–5 мин, что позволяет в кратчайшие сроки вывести систему в стабильное состояние. Временной промежуток в данном случае был получен эмпирическим спосо-

бом – неоднократным тестированием целостной инфраструктуры.

Если выходят из строя все серверы записи, остается лишь один виртуальный сервер. Он будет и далее единственным, так как в AWS имеется инструмент, позволяющий обеспечить работоспособность сервера в любом случае за счет нескольких зон доступности и Auto Scaling Group [4]. Этот инструмент выполняет непрерывный мониторинг ресурсов пользователя в рамках зоны доступа AWS. Если зона доступа с сервером становится недоступной, инструмент за считанные минуты автоматически перестраивает инфраструктуру в резервной зоне.

В настоящей статье описан подход построения отказоустойчивой системы с вероятностными алгоритмами, который позволяет передавать непрерывный поток данных на серверы записи, используя многопоточную маршрутизацию. Он уникален тем, что система автоматически адаптируется под реальные условия среды с помощью вероятностного алгоритма, предугадывая критические ситуации (например, увеличение количества потерянных пакетов провайдером и дальнейший выход из строя маршрута). Также данный алгоритм позволяет системе автоматически адаптироваться под реальные условия среды передачи данных. Например, снижение скорости передачи данных на одном из каналов в автоматическом режиме позволит скорректировать количество пакетов, передаваемых этим путем, что позволит сохранить нагруженность канала на исходном уровне, позволяя использовать его как для административных целей (управление оборудованием), так и для задач мониторинга.

Основываясь на вышеизложенном, стоит отметить, что настоящая система получает прирост производительности за счет одновременного использования нескольких каналов связи: прирост заключается в возможности использования каждого из имеющихся каналов для административных целей.

Дальнейшей перспективой разработки предложенной схемы коммутации является тестирование, нахождение идеальных настроек алгоритма и окончательное внедрение в рабочую схему. Результаты, полученные в ходе работы, могут быть востребованы при создании нового программного обеспечения производителями оборудования, а также инженерами теле- и радиовещания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельник В. С. Исследование алгоритмов для решения задачи маршрутизации пакетов в компьютерной сети // XXI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018). СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 673–676.

2. Мельник В. С., Горячев А. В. Построение географически-распределенной компьютерной системы и оценка ее надежности // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 5. С. 19–25.

3. How PCC works. URL: https://wiki.mikrotik.com/wiki/How_PCC_works_%28beginner%29 (дата обращения 13.05.2019).

4. AWS Auto Scaling. URL: <https://aws.amazon.com/autoscaling/> (дата обращения 13.05.2019).

V. S. Melnik

Saint Petersburg Electrotechnical University

MULTI-THREAD ROUTING IN THE AUTOMATED SYSTEM OF ACCOUNT OF FINITE NODES OF THE DISTRIBUTED CLUSTER

This article describes the approach to designing a geographically distributed system that uses multi-threaded routing. This mechanism allows you to increase the fault tolerance of the designed system as a whole through the use of more than one communication channel between the end nodes.

In addition to solving the problem of improving reliability, the article outlines a technique that allows balancing resources, allowing you to use all available communication channels.

The aim of the research is to develop a comprehensive solution for the design of the infrastructure for transmitting a continuous data stream by several routes, which ensure fault tolerance and share the load among themselves, allowing these routes to be used for administrative purposes, for example, to monitor the system and track critical situations, as well as to manage existing nodes.

In the proposed design scheme, it is proposed to ensure the fault tolerance of a geographically distributed system so that each of the message chains acts as an independent unit of the computer system. In the results of the work, an analysis was made of various options for connecting the system taking into account the probability of failure of each of the independent links.

Network infrastructure design, fault tolerance, reliability, redundancy, load balancing, routing, distributed systems, cluster systems

УДК 004.387

И. В. Герасимов, С. А. Кузьмин, Н. М. Сафьянников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. В. Рудинский

ЗАО «НПЦ «Аквамарин»

Сложнофункциональные блоки вычислительной перцепции в классе вычислительно-преобразовательных цепей

Исходя из совокупности обобщенных свойств физической символьной системы (ФСС), рассматривается структурно-аналоговая архитектура средств вычислительной перцепции. При этом привлекаются различные уровни абстрагирования природоподобного объекта. Применение архетипов в классификации вычислительно-преобразовательных цепей (ВП-цепей) на операционных с управляемым параметром элементах обеспечивает возможность систематизации не только имеющихся, но и мыслимых структур. Исходя из онтологической интерпретации структурно-функциональной модели, ее качество определяется качеством понятий и отношений между ними. В условиях дестабилизации воздействий внутренней и внешней среды обеспечение равновесного состояния цели обеспечивается с помощью механизма гомеостазиса. Для математического описания структуры ВП-цепей как потоковых устройств нейросетевой архитектуры используются результаты аппроксимации воспроизводимых зависимостей «вход-выход» в классе рациональных функций (по параметру управления проводимостью операционных элементов). При описании класса объектов и множеств отображений (морфизмов), переводящих одни объекты в другие, привлекается теория категорий. Общая задача синтеза сводится к генерации полного множества неизоморфных циклически связанных не-приводимых структур s-моделей ВП-цепей. Приводится процедура синтеза минимальной по рангу s-модели ВП-цепи. Обсуждаются примеры оригинальных разработок, где использованы свойства вычислительной перцепции в природоподобных объектах искусственного происхождения.

Вычислительная перцепция, вычислительно-преобразовательные цепи, структурно-аналоговые вычисления, s-моделирование, теория категорий, функтор, структурное число, рельефная виртуализация, сенсор, тремор

Согласно современным представлениям, перцепция – «суперпозиция трех полевых структур:

поля сознания, поля обработки информации и поля мышления». Привлекаемый формализм име-

ет волновую природу. Распределенность во времени и в пространстве – характерное свойство волновых процессов, способных к изменению при сохранении целостности. В том смысле, что процесс имеет наряду с актуальным также и потенциальное содержание.

Здесь мы акцентируем внимание на понятии непрерывности, играющем фундаментальную роль в теории топологических пространств. Понятие непрерывности и ее критерии изложены в [1]. Для рассматриваемого функционального преобразования ВП-цепей на операционных с управляемым параметром элементах важен тот факт, что достаточно регулярное топологическое пространство задается топологией поточечной сходимости функциональных признаков. В связи с этим уместно напомнить тезис о том, что нет ничего практичнее хорошей теории.

При создании и развитии семейства моделей средств вычислительной перцепции природоподобного объекта привлекаются различные уровни абстрагирования:

- философское или теоретико-познавательное описание замысла технической системы (ТС);
- представление ТС на языке выбранной научной теории;
- проектное представление ТС;
- конструкция ТС;
- технологическое обеспечение ТС;
- материальное воплощение ТС.

Формирование совокупности обобщенных свойств ТС требует разработки ее обобщенной модели на основе методов теории категорий в модельно-ориентированной системной инженерии.

Обобщенная модель должна быть абстрактной: она может использовать только общие принципы, не привлекая физическую реализацию. Здесь под объектом понимается вещь (явление) в единстве своих взаимодополняющих и потенциально возможных (виртуальных) свойств. Теория познания (когнитология), принадлежа в основном философии, находится за пределами нашего обсуждения. Материал сконцентрирован на изложении прикладной проблемы – оптимального структурного синтеза вычислительно-преобразовательной цепи (ВП-цепи) на операционных с управляемым параметром элементах.

К основным признакам ВП-цепей, выделяющими их в самостоятельный класс специализированных вычислительных устройств преобразования формы информации и вида энергии, относятся:

- сетевая структура на операционных с аналоговыми и цифровыми атрибутами элементах;

- использование принципов: параллельной обработки информации разной формы представления, параметрической инвариантности, совмещения операторов изменения формы представления и ее обработки;

- распределенность и управляемость потоков данных по операционным элементам сети;

- определяющая роль процедур обучения и автореферентных (нелинейных циклических по управлению) процессов в представлении и обработке данных различной онтологической природы;

- наличие во всех объектах класса ВП-цепей единого обобщенного архетипа (понятие гомотопии как соответствия возникает в связи с построением архетипа);

- обеспечение равновесного состояния цепи (гомеостазиса) является первичной целью управления при реализации ее функционального назначения (в условиях широкого диапазона воздействий внутренней и внешней среды); приспособление к новым условиям функционирования осуществляется за счет изменения параметров операционных элементов или структуры цепи.

Общая постановка задачи. Сложно-функциональный блок (СФ-блок) – это «функционально-законченный фрагмент сверхбольшой интегральной схемы (СБИС), предназначенный для многократного повторного использования, универсальный (полимодальный) или специализированный по назначению» [2], [3]. Это предмет интеллектуальной собственности, передаваемый другой стороне в виде различного типа моделей: текст на языке описания аппаратуры («soft»), логической схемы («firm»), списка цепей или топологии («hard») [2]–[4]. Представление структуры систем графами регламентируется, в частности, стандартом IEC81346 [5], [6].

Специфика разработки СФ-блока, в отличие от других изделий микроэлектроники, заключается в том, что создается не физический прибор, а комплект моделей и технической документации СФ-блока для системы автоматизированного проектирования (САПР) СБИС. Естественным источником математических моделей и анализа мегамodelей служит теория категорий [6]–[8].

Здесь участвуют и образная, и знаковая составляющие. Носителями второй служат слова естественного языка, а их сигнатурой – логические операции. По этой причине их называют логико-лингвистическими моделями [9]. Кстати, термин «функтор» как один из базовых в теории категорий был позаимствован математиками из работ философа Р. Карнапа, касающихся лингви-

Таблица 1

Концепция	Описание	Деятельность
Мир слова предметной области СВП	Общая схема представления и использования знаний применительно к семантическому. Веб-спецификация концептуализации, состоящая из словаря и теории. Таксономия и мерономия	Фильтрация и классификация информации, индексирование собранной информации, систематизация общей терминологии между программными агентами и пользователями. Релевантность к запросу пользователя
Расслоенное произведение топологических пространств (pullback)	Предел диаграммы, состоящей из семи морфизмов или функторов F, G, H, f, g, f' и g' , $U = A \times_C B = \{(a, b) \in A \times B \mid f(a) = g(b)\},$ $V \in U;$ категории: I – имя перехода, C – поле комплексных чисел	
Склеивание пространств в категории топологических пространств (расслоенное копроизведение – pushout)	Предел диаграммы, состоящей из семи морфизмов или функторов F, G, H, f, g, f' и g' , $V = A \times_C B = (A + B) / \sim;$ категории: I – имя перехода, C – поле комплексных чисел	
Метасистемные переходы с использованием языка моделирования на основе теории категорий	Комбинация методов pullback и pushout с учетом вертикальной иерархии	

стики. К образному аспекту логико-лингвистической модели относят структурную составляющую. Она отражает в явном виде связи между словами, объединяемыми в систему. К моделям этого типа относятся: система понятий; классификация; семантическая сеть; ER-диаграммы и т. д.

В отсутствие объективного объекта (что свойственно исследовательскому проектированию согласно этимологии термина «project» – «брошенный вперед»), эти модели имеют существенную субъективную составляющую¹.

¹ Она проявляется, прежде всего, в трактовке субъектом познания смысла используемых понятий. Более того, определения понятий в нормативных документах могут быть недостаточно квалифицированными.

«По мегамодели, представляющей собой конфигурацию некоторой системы вычислительной перцепции, требуется спроектировать модель еще не существующей системы как целого и рассчитать для нее моделируемые параметры, в том числе эмерджентные – не присущие никакой из составляющих единиц в отдельности» [6]. Схематически этот критерий изображен на рис. 1 [6].

По кибернетической терминологии средства вычислительной перцепции (СВП) – это реактивные системы, представляющие собой транзакционную конструкцию. Возьмем, например, зрительное восприятие листа растения. Нейрофизиологами установлено, что наш глаз фиксирует лишь конечное число точек контура листа либо какого-либо другого объекта информации, а не

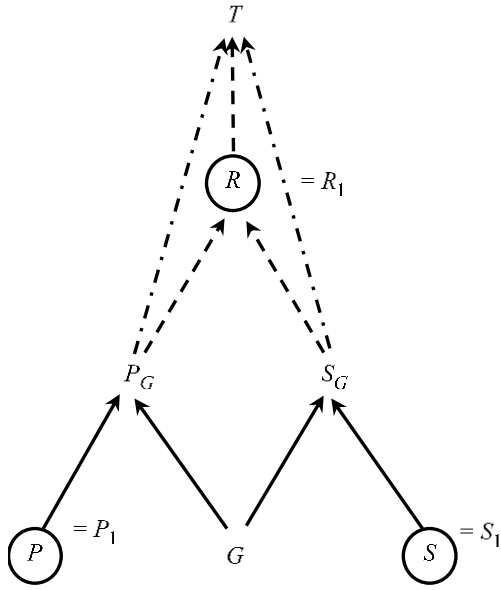


Рис. 1

картину, характеризующую форму листа в целом. В ментальном пространстве формируется целостный образ объекта благодаря интеллектуальной деятельности мозга (реализуются так называемые когнитивные процедуры). Мозг по конеч-

ходимый ресурс за счет структурной и параметрической вариативности. Математика же дает научный аппарат – алгебраическую топологию (табл. 1).

Декомпозиция общей задачи. Рассмотрим следующую формальную конструкцию. Пусть имеется таксон (класс) T с архетипом $\alpha(T)$ и содержащийся в этом таксоне таксон T_1 с архетипом $\alpha(T_1)$. Отношение между архетипами $\alpha(T)$ и $\alpha(T_1)$ изображается диаграммой² (рис. 2).

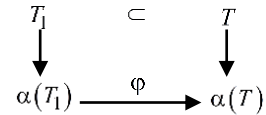


Рис. 2

Здесь можно привлечь следующий аппарат из топологии – расслоенное произведение.

Естественное преобразование является специальным морфизмом $\lambda: F \rightarrow G$ между двумя любыми функторами F и G , как показано в категории $\mathbf{D}$ на рис. 3, он также должен удовлетворять $\lambda_B \circ Ff = Gf \bullet \lambda_A$ [12].

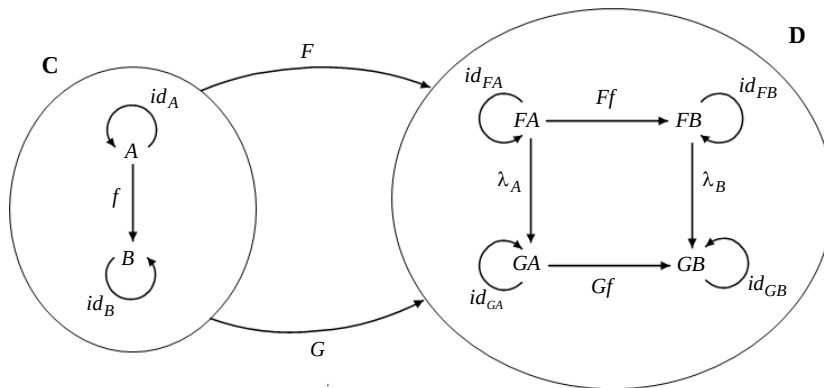


Рис. 3

ному числу увиденных точек выполняет все дополнительные вычислительные процедуры, благодаря которым восполняется не увиденное глазом. Ясно, что по набору точек восстановить представление о форме объекта можно лишь в том случае, когда она уже более или менее знакома (визуально или тактильно). Несмотря на значительную степень информационной неопределенности мозг решает задачу идентификации с вполне удовлетворительной для практики точностью и достаточно быстро. Заметная роль отводится интуиции, но требуется также предварительное знакомство с объектом. По сути, мы имеем дело с неустойчивой, т. е. некорректной задачей. Отсюда неизбежна процедура обучения, способствующая восполнению недостающей информации. ВП-цепи предоставляют для этого необ-

Если даны четыре объекта A, B, C, U и два морфизма $f: A \rightarrow B$ и $g: B \rightarrow C$ в категории $\mathbf{C}$, их расслоенное произведение (pullback) – это объект U и пара морфизма $g': U \rightarrow A$ и $f': U \rightarrow B$; как показано на рис. 4, они соответствуют следующим условиям [12]:

$$1) f \circ g' = g \bullet f';$$

2) если категория $\mathbf{I}$ имеет какие-либо другие объекты V и функторы $G: V \rightarrow A$ и $F: V \rightarrow B$,

² Для описания концептуальной модели будущего изделия привлекаются различные стандарты (например, IDEFx). Акцент на диаграмматику обусловлен рядом причин, некоторые из которых изложены в [10], [11]. С этой точки зрения реализован международный стандарт IEC81346-1:2009 «Промышленные системы, установки и оборудование – принципы структурирования и ссылочные обозначения – часть 1: основные правила» [5].

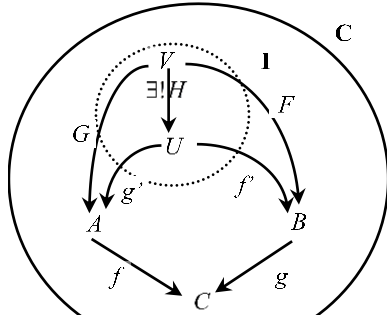


Рис. 4

то существует единственный функтор $H: V \rightarrow U$, а значит, $G = g' \circ H$ и $F = f' \bullet H$.

Модель черного ящика трактуется авторами не в математическом, а в системном смысле – в качестве системного образа (в смысле сочетания виртуальных и актуальных свойств создаваемого объекта) [13].

Под серым ящиком понимается тот факт, что получена приближенная функция φ (например, в классе рациональных функций), воспроизводящая отображение «вход-выход» в ВП-цепи:

$$\varphi: X \rightarrow Y,$$

где X – область определения функции; Y – область значений функции.

Согласно [14], наибольшей общностью обладает модель, представленная многосортной алгебраической системой $\langle A, C, F, P \rangle$. В ней: A – множество предметных переменных (носитель), C – множество констант (домен-значение переменной), F – множество функций, P – множество предикатов. При интерпретации символов A , отношений множества выражений V и связей E между ними используют граф $G = (V, C, E)$. Благодаря ему модель структуры ВП-цепи оказывается наглядной (в ней C – множество меток, характеризующих управляемость/неуправляемость соответствующего ребру операционного элемента).

Общая задача синтеза сводится к композиции деревьев и 2-деревьев помеченного полюсного графа ВП-цепи, обладающих определенными топологическими признаками, в зависимости от ранга и соотношений между рангами, характеризующими детерминантные функции цепи. Деревья и 2-деревья – более крупные фрагменты конфигурации цепи, чем отдельные ребра графа цепи, соответствующие операционным элементам того либо другого типа. Расширяя типы 2-деревьев, участвующих в топологических формулах ВП-цепей, и изменяя функции перенумерации, с помощью которых устанавливается изоморфизм

ВП-цепей, достигается возможность их масштабирования при сохранении процедур определения циклической связности, классификации и генерации неприведенных структур (N -структур). Посредством введения такого инварианта, как приведенная структура (P -структура), удастся упростить решение задачи 2-изоморфизма N -структур.

$$F \{H_T, \text{rang}(S), \text{rang}'(S_{kn})\} \rightarrow \min_{H_T \in H_T}$$

при $\text{rang}(S) = r$, $\text{rang}'(S_{kn}) = r_{kk}$, $T = \{T_1, T_2\}$,

$$H_T \not\approx H'_T, \quad \exists_{\alpha \in A} \quad \forall_{\beta \in A} \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \alpha} \cap \frac{\partial A}{\partial \beta} \neq 0 \right).$$

Синтез минимальной по рангу s -модели ВП-цепи. Согласно [15], справедлива следующая теорема синтеза N -структуры s -модели ВП-цепи.

Теорема. Минимальная по рангу r N -структура ВП-цепи представляет собой композицию

$$H_{T_{\min}} = DR_V \cup DR_\eta$$

двух сопряженных деревьев DR_V и DR_η , $DR_V \in \tilde{DR}_V$, $DR_\eta \in \tilde{DR}_\eta$. Здесь $\cup$ – знак композиции деревьев, определяемой как такое наложение двух деревьев, при котором их конечные вершины с одинаковыми метками совпадают. Доказательство есть в [16].

Пусть $r = 1$. Тогда $n = 2$, $m = 2$ и возможны следующие три варианта N -структур (рис. 5) [16]. Ранг N -структуры, изображенной на рис. 5, в, равен 1, т. е. N -структура, минимальная по рангу $r = 1$, существует [16]. Допустим, что существует N -структура $H_{T_{\min}}$, минимальная относительно ранга $r = p$. Тогда, $n = p + 1$, $m = 2p$ и $H_{T_{p\min}} = DR_V^p \dot{\cup} DR_\eta^p$, где $\langle DR_V^p \dot{\cup} DR_\eta^p \rangle$ – единственная пара сопряженных деревьев N -структуры, причем DR_V^p – дерево из ветвей типа g , а DR_η^p – дерево из ветвей типа $G\theta$ [16].

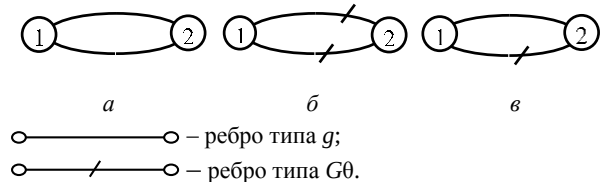


Рис. 5

Пример. Требуется построить минимальную ВП-цепь в базовом наборе операционных элементов (рис. 5). Здесь во внимание принимается

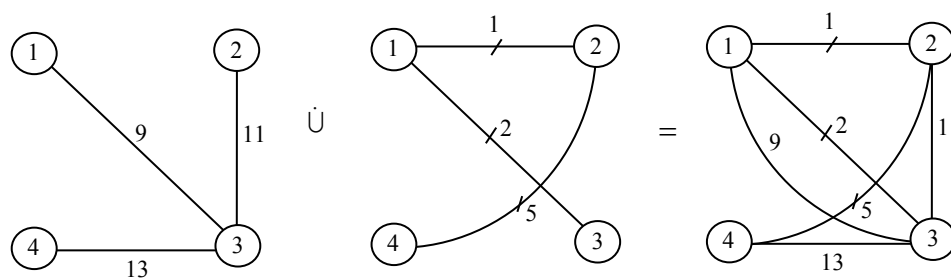


Рис. 6

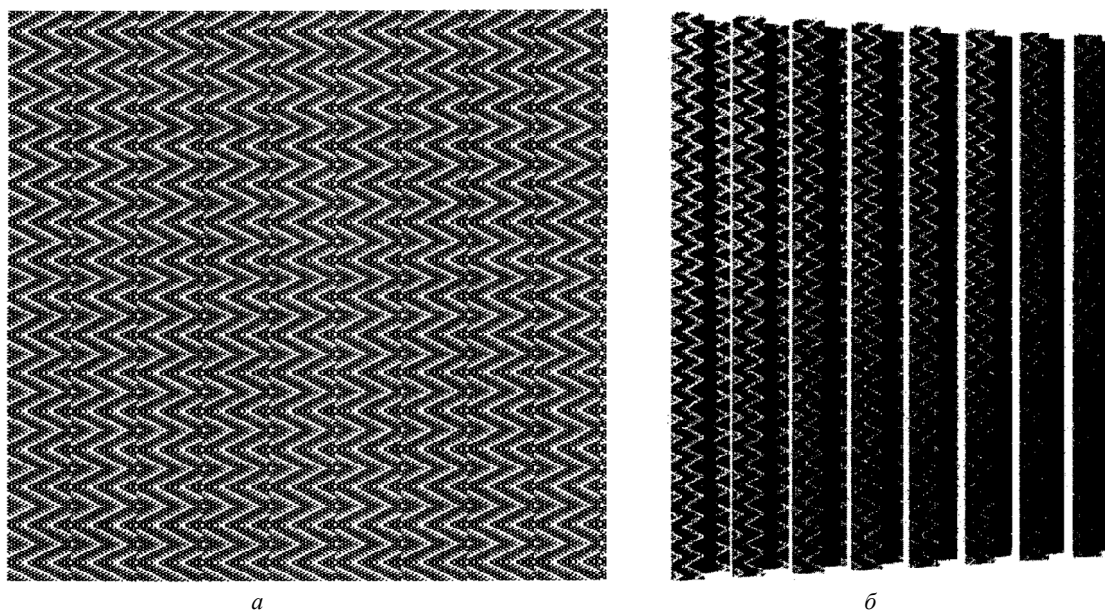


Рис. 7

только вид функции преобразования операционных элементов. Конкретные же значения операционных элементов не учитываются. Учет последних осуществляется на этапе параметрического синтеза. N -структура представляет собой результат композиции двух сопряженных деревьев: одно из них состоит из ветвей типа g , а другое – из ветвей типа $G\theta$ [15] (рис. 6).

Используемые детерминантные функции приведены в табл. 2. $\Delta(\theta)$ – детерминантная функция ВП-цепи; $\Delta_{KK}(\theta)$ – детерминантная функция, характеризующая степень сложности электрической цепи [16], [17].

Примеры приложений. В качестве примера использования свойств вычислительной перцепции в природоподобных объектах искусственного происхождения, возьмем ткани со скрытыми объемными изображениями [18]. На рис. 7, а показан пример рисунка ткани с диагональным переплетением. Двухплоскостная рельефная визуализация показана на рис. 7, б.

Свойства вычислительной перцепции могут также использоваться при оценке состояния центральной нервной системы человека. Структура устройства приведена на рис. 8 [19].

Таблица 2

Детерминантные функции		Ребра N -структуры					
		1	2	5	9	11	13
$\Delta(\theta)$	θ^3	1	1	1	0	0	0
		1	0	1	1	0	0
		1	1	0	0	0	1
		0	1	1	0	1	0
		0	1	1	0	0	1
		1	0	1	0	1	0
	θ^2	1	0	1	0	0	1
		1	0	0	1	0	1
		0	0	1	1	1	0
		0	1	0	0	1	1
		0	0	1	1	0	1
		1	0	0	0	1	1
	θ^1	0	0	0	1	1	1
		1	1	0	0	0	0
		0	1	1	0	0	0
		1	0	0	1	0	0
		0	0	1	1	0	0
		1	0	0	0	1	0
$\Delta_{KK}(\theta)$	θ^1	1	0	0	0	0	1
		0	0	1	0	1	0
		0	0	1	0	0	1
		0	0	1	0	0	1
		0	0	0	1	1	0
		0	0	0	0	1	1
	θ^0	0	0	0	1	1	0
		0	0	0	0	1	1
		0	0	0	0	1	1
		0	0	0	0	1	1



теза о физической символической системе, с привлечением которой графовые модели ВП-цепей предполагают расширение аппарата грамматик, описывающих процедуры генерации полюсных графов. Поэтому при решении конкретных прикладных задач, в которых средства управления и перцепции играют определяющую роль, необходимо обращать особое внимание на выбор компонентного базиса и ограничения, связанные с решением задачи установления изоморфизма возникающих при генерации структур. *S*-моделирование предполагает привлечение когнитивных представлений и использование для описания соответствующих контекстных условий. При установлении структурного соответствия, по-видимому, следует обратиться к понятиям гомологии и аналогии, положенным в основу математического моделирования в биологии и теории открытых систем.

Установлено, что параллелизм, свойственный обобщенной форме представления экстенсивных и интенсивных величин в цепи, требует привлечения для его изучения графовариативного анализа. Непосредственный комбинаторный синтез структур

49

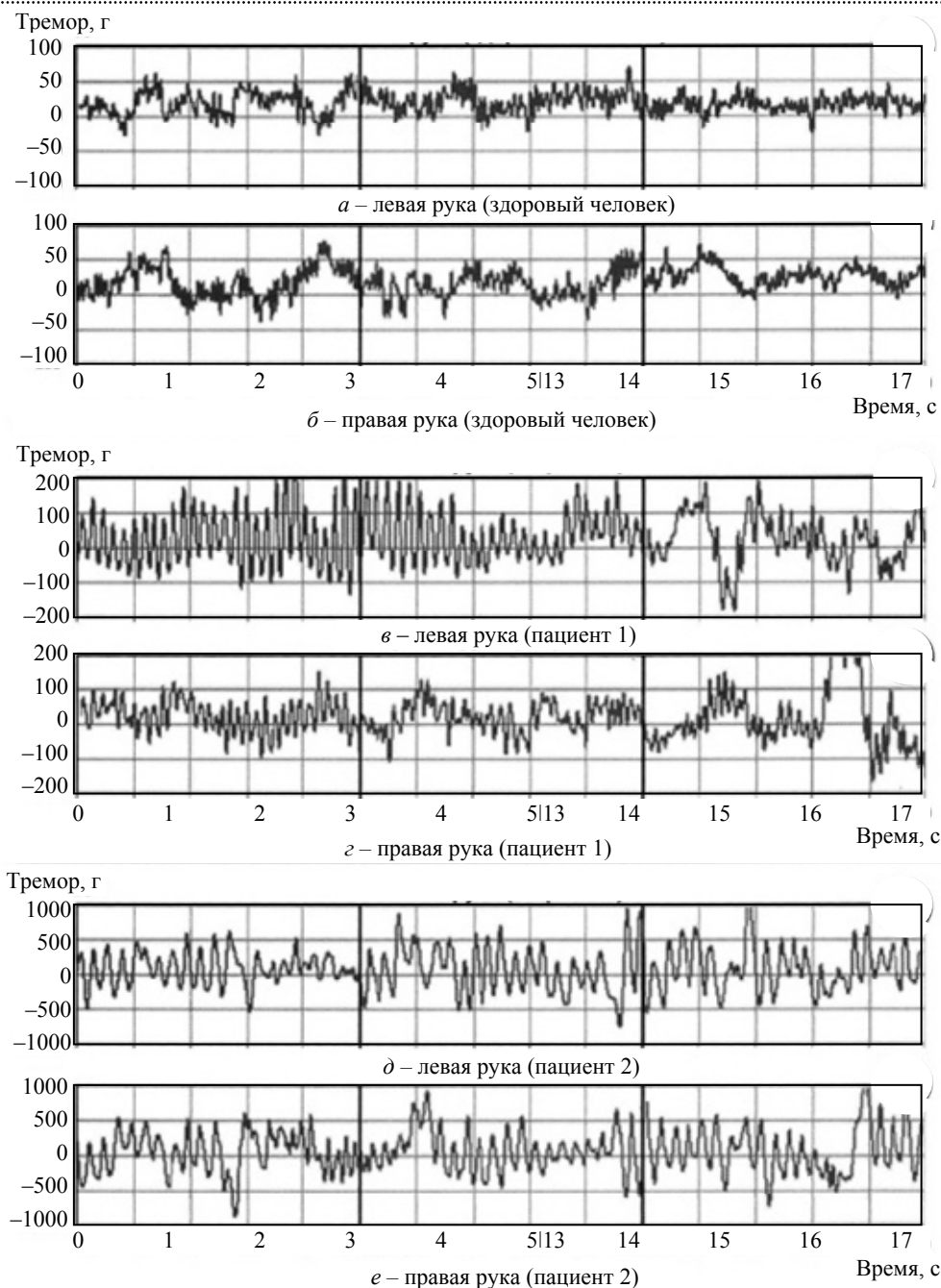


Рис. 9

ВП-цепей имеет экспоненциальный рост размерности задачи. И в качестве универсального выхода из этого предположения предложен переход к алгебраическим методам с привлечением структурных чисел с выполнением декомпозиции общей задачи на некоторую иерархию более простых задач. На каждом из уровней максимально учитываются особенности пространства состояний, в котором развивается композиционный потоковый процесс. При этом выполненная декомпозиция исходной задачи опирается как на смысловое разбиение на ряд самостоятельных задач, так и на структурное преобразование пространства состояний с учетом локальных характеристик свойств потокового процесса. СБИС

по технологии «система на кристалле» выходят на новый уровень.

Именно в таком контексте подготовлена эта статья, авторы которой развивают традиции научного направления по методам и средствам повышения эксплуатационно-технических характеристик и функциональных возможностей встраиваемых систем, заложенного трудами школы В. Б. Смолова по теории и практике гибридных функциональных преобразователей.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 8.2080.2017/ПЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams C. C., Franzosa R. D. Introduction to topology: pure and applied. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008. 512 p.
2. Профессиональный стандарт 40.016. Инженер в области проектирования и сопровождения интегральных схем и систем на кристалле. М.: Фонд инфраструктурных и образовательных программ (РОСНАНО), 2014. 36 с.
3. Герасимов И. В., Сафьянников Н. М., Якимовский Д. О. Сложно-функциональные блоки смешанных систем на кристалле: автоматизация функционального проектирования / под ред. И. В. Герасимова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 237 с.
4. Стандарт предприятия СТП ИЛТА 06.00.00-09 «Микросхемы интегральные. Системы на кристалле и сложно-функциональные блоки. Термины и определения». М.: АО «НИИМА «Прогресс», 2009.
5. IEC 81346-1:2009. Industrial systems, installations and equipment and industrial products. – Structuring principles and reference designations. Part 1: Basic rules. Geneva: ISO, 2009. 168 p.
6. Ковалев С. П. Методы теории категорий в модельно-ориентированной системной инженерии // Информатика и ее применения. 2017. Т. 11, вып. 3. С. 42–50.
7. Букур И., Деляну А. Введение в теорию категорий и функторов. М.: Мир, 1972. 259 с.
8. Mabrok M. A., Ryan M. J. Category theory as a formal mathematical foundation for model-based systems engineering // Appl. Mathematics & Information Sciences. 2017. Vol. 11, № 1. P. 43–51.
9. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергия, 1981. 231 с.
10. Гуд Г. Х., Макол Р. Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / пер. с англ.; под ред. Г. Н. Поварова. М.: Сов. радио, 1962. 383 с.
11. Основания технологии комплементарного проектирования наукоемких изделий / И. В. Герасимов, С. А. Кузьмин, Л. Н. Лозовой, А. В. Никитин; под ред. И. В. Герасимова и А. В. Никитина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 196 с.
12. Yanwen Q. The basis of formal semantics and formal specification. Second Edition. Beijing: China: Science Press, 2010. 496 p.
13. Микони С. В., Ходаковский В. А. Основы системного анализа. СПб.: ПГУПС, 2011. 143 с.
14. Колмогоров А. Н., Драгалев А. Г. Введение в математическую логику. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. 120 с.
15. Герасимов И. В. Теория, проектирование и применение вычислительно-преобразовательных цепей (синтез и реализация): дис. ... д-ра техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1986. 420 с.
16. Абдулраб А. А. Генератор графовых моделей вычислительно-преобразовательных цепей как потоковых процессоров сред виртуальных инструментов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. Вып. 2. С. 23–27.
17. Беллерт С., Возняцки Г. Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел / пер. с польского; под ред. П. А. Ионкина. М.: Мир, 1972. 332 с.
18. Пат. RU 2420617 (РФ). Способ получения тканей диагональных переплетений / Н. А. Преснецова, Н. М. Сафьянников. Подана заявки: 04.19.10. Публикация патента: 10.06.2011.
19. Пат. RU 2613446 (РФ). Способ оценки функционального состояния центральной нервной системы человека и устройство для его реализации / П. Н. Буренев, О. Б. Кострова, Н. М. Сафьянников, З. А. Александян, Н. Н. Разин, 2015. Подана заявки: 2013-04-29. Публикация патента: 10.02.2015.

I. V. Gerasimov, S. A. Kuzmin, N. M. Safyannikov
Saint Petersburg Electrotechnical University

A. V. Rudinsky
PJSC «RPC "Akvamarin"»

COMPLEX-FUNCTIONAL BLOCKS OF COMPUTATIONAL PERCEPTION IN THE CLASS OF COMPUTATIONAL-TRANSFORMATIVE CIRCUITS

Based on the set of generalized properties of the physical character system (FSS), the structural-analog architecture of computational perception is considered. Different levels of abstraction of a natural-like object are involved. The use of archetypes in the classification of computing-conversion circuits (VP-circuits) on operating with controlled parameter elements provides the possibility of systematization of not only available, but also conceivable structures. Based on the ontological interpretation of the structural and functional model, its quality is determined by the quality of the concepts and the relationships between them. In the conditions of destabilization of the internal and external environment, ensuring the equilibrium state of the target is provided by the mechanism of homeostasis. For the mathematical description of the structure of VP-circuits as stream devices of neural network architecture the results of approximation of reproducible dependences «input-output» in the class of rational functions (by the parameter of control of conductivity of operating elements) are used. When describing a class of objects and sets of mappings (morphisms) that translate one object into another, the theory of categories is involved. The General problem of synthesis is reduced to generation of a complete set of non-isomorphic cyclically connected irreducible structures of s-models of VP-chains. The procedure of synthesis of the minimum rank of the s-model of the VP-chain is given. The examples of original developments where the properties of computational perception in natural-like objects of artificial origin are used are discussed.

Computational perception, computational-transform circuits, structural-analog computations, s-modeling, category theory, functor, structural number, relief virtualization, sensor, tremor

УДК 007.3

Назаренко Н. А., Падерно П. И.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оценка логической сложности и стереотипности циклических структур в алгоритмах деятельности оператора

Проведен анализ оценки алгоритмов деятельности операторов в процессе проектирования человеко-машинных систем. Представлен новый подход к оценке коэффициентов стереотипности и логической сложности алгоритмов деятельности, имеющих в своей структуре циклы (повтор ряда операций). Показаны основные типовые функциональные структуры и соответствующие расчетные формулы для вычисления длин (размеров) и коэффициентов стереотипности и логической сложности отдельных фрагментов с циклической структурой. Предлагаемый подход, являясь инструментом разработчика человеко-машинной системы, в значительной степени упрощает его расчетную деятельность, позволяет производить оценку основных характеристик алгоритмов деятельности оператора поэтапно. Кроме того, предлагаемое, в рамках подхода представление зависимостей облегчает понимание получаемых промежуточных и окончательных оценок. Подход положен в основу проектируемого информационного модуля поддержки деятельности разработчика при решении задач, связанных с оценкой алгоритмов деятельности операторов разрабатываемых сложных человеко-машинных систем и комплексов различного назначения.

Алгоритм деятельности, логическая сложность, стереотипность, циклические структуры, оператор, качество алгоритмов деятельности, человеко-машинные системы

Сложившаяся практика проектирования различных человеко-машинных информационных систем и комплексов, а также требования нормативных документов [1], [2] предполагают на ранних этапах проектирования проведение оценки показателей стереотипности и логической сложности алгоритмов деятельности (АД) операторов. Оценка должна выполняться разработчиком, возможно с привлечением контрагентов. При этом сам разработчик может не обладать необходимыми знаниями и умениями для проведения такой оценки, а в ряде случаев окажется неспособен достаточно адекватно описать (в некотором формальном представлении) алгоритмы выполнения оператором комплекса поставленных задач. Предложенные в [3] и используемые в [1], [2] соотношения относятся только к последовательно выполняемым операциям и к тому же нечетко описывают используемую методику оценки нормированных коэффициентов стереотипности и логической сложности. При анализе реальных АД, выполняемых операторами, в [4], [5] показано, что в АД зачастую имеются операции контроля, проверки правильности выполнения от-

дельных фрагментов и др., т. е. реальные АД имеют вложенные циклы. Таким образом, возникает необходимость получения и предоставления разработчикам необходимых аналитических выражений для оценки нормированных показателей логической сложности и стереотипности АД, включающих различные циклы.

Оценка алгоритмов деятельности. Современное состояние. Основной особенностью оценки показателей логической сложности и стереотипности АД на этапе проектирования является необходимость проведения таких оценок на основании описания АД, которое составляется на основе руководств (инструкций) для оператора и зачастую не отражает реальной специфики его деятельности. Проблема недостаточно адекватного описания АД возникает, кроме того, и при использовании новых технических средств и информационных технологий, для которых ранее не исследовались особенности и стереотипы деятельности оператора. Кроме того, результаты оценки нормированных показателей очень сильно зависят от уровня квалификации специалиста, выполняющего данную оценку.

Соотношения, предложенные в [3] для оценки нормированных коэффициентов стереотипности и логической сложности были включены в нормативно-техническую документацию [1], [2] практически без пояснений, и с тех пор не развивались и не анализировались, хотя и нашли весьма успешное применение как для обучения студентов [6], [7], так и при решении конкретных достаточно простых задач исследования и разработки [8], [9].

Необходимо заметить, что из трех основных первоначальных методов, связанных с описанием и оценкой АД на ранних этапах проектирования: операционно-психологического метода Г. М. Закавского [10], структурно-алгоритмического метода Г. В. Суходольского [11] и обобщенного структурного метода А. И. Губинского и В. Г. Евграфова [4], развился только третий. Это развитие реализовалось в следующих направлениях: функционально-структурная теория [5]; использование аппарата теории нечетких множеств [12]; введение векторов различных ошибок [13], [14]; изменение характеристик выполняемых операций в зависимости от времени [15]–[18].

Использование обобщенного структурного метода и его описанных модификаций и продолжений показало, что метод достаточно удобен и не требует специфических знаний при его реализации. Все вышесказанное предопределило целесообразность использования основных подходов обобщенного структурного метода при оценке нормативных коэффициентов стереотипности и логической сложности АД со сложной структурой.

Кроме того в [19], [20] был реализован подход и получены расчетные зависимости значительно упрощающие оценку этих коэффициентов проектировщиком, которые были апробированы в конкретных работах.

Предлагаемый далее подход является комплексированием этого подхода и обобщенного структурного метода.

Структуры алгоритмов деятельности. Изменение структуры алгоритма, появление циклов, выполнение контроля безошибочности работы оператора с необходимым повтором ряда операций, влекут за собой необходимость получения аналитических выражений для различных типовых фрагментов алгоритмов деятельности операторов.

В [4], [5] используются понятия типовых функциональных единиц (ТФЕ) и типовых функциональных структур (ТФС), наиболее часто встречающиеся в алгоритмах деятельности операторов.

При этом ТФЕ также состоят из элементарных действий и логических операций [19], [20]. При необходимости ТФЕ могут, в свою очередь, быть интерпретированы как некоторые структуры.

Получение расчетных зависимостей. Используемые соотношения. По аналогии с [19], [20] будем использовать следующие положения и соотношения:

При объединении нескольких выполняемых последовательно структур $Q = \bigcup_{i=1}^n R_i$ с соответствующими нормированными коэффициентами стереотипности s_i , $i = 1, 2, \dots, n$ и логической сложности l_i , $i = 1, 2, \dots, n$ и числом операций m_i , $i = 1, 2, \dots, n$ для результирующей структуры Q значения нормированных коэффициентов стереотипности и логической сложности могут быть вычислены по следующим формулам

$$S_Q = \frac{\sum_{i=1}^n m_i s_i}{M_Q}, \quad L_Q = \frac{\sum_{i=1}^n m_i l_i}{M_Q},$$

где $M_Q = \sum_{i=1}^n m_i$.

Полученный результат можно описать в виде следующего соотношения

$$\bigcup_{i=1}^n R_i(s_i, l_i, m_i) = Q(L_Q, S_Q, M_Q).$$

Необходимо заметить, что, в терминах обобщенного структурного метода, это есть не то иное как характеристики стереотипности и логической сложности наиболее простой типовой функциональной структуры (ТФС 1) «Последовательно выполняемые рабочие операции» [4], [5].

Замечание. Если каждая из структур $R_i(s_i, l_i, m_i)$ имеет одинаковую стереотипность $s_1 = s_2 = \dots = s_i = \dots = s_n = s$ и логическую сложность $l_1 = l_2 = \dots = l_i = \dots = l_n = l$, то стереотипность и логическая сложность результирующей структуры $R_i(s_i, l_i, m_i)$ принимают достаточно простой вид:

$$S_Q = s, \quad L_Q = l, \quad M_Q = \sum_{i=1}^n m_i.$$

Будем полагать, что возможно также и умножение длины некоторой структуры на число повторов при многократном повторении.

1. Проведем анализ ТФС «Рабочая операция и операция контроля без ограничений на число повторов». Данная ТФС используется в описании АД в тех случаях, когда после выполнения некоторой рабочей операции (решения конкретной задачи) осуществляется контроль правильности ее выполнения, в зависимости от результатов которого операция либо выполняется повторно, либо *считается* выполненной правильно. Составляющие данной ТФС в соответствии с [3]–[5] могут быть агрегированы с целью получения укрупненной (рабочей) операции. Детализированное и укрупненное представление ТФС «Рабочая операция и операция контроля без ограничений на число повторов» приведены на рис. 1.

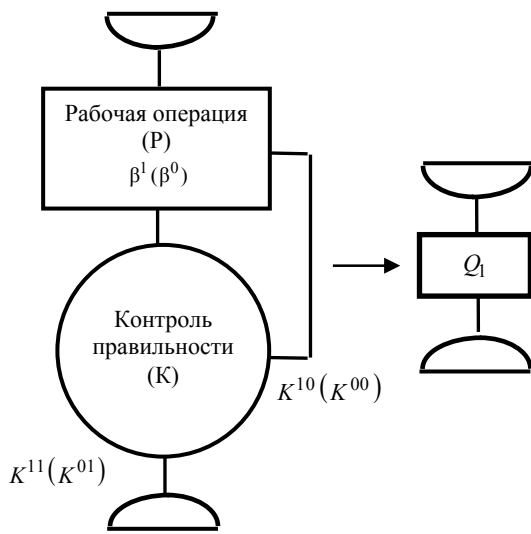


Рис. 1

Используем следующие обозначения вероятностных характеристик рассматриваемой ТФС:

– $\beta^1(\beta^0)$ – вероятность безошибочного (ошибочного) выполнения рабочей операции;

– $K^{11}(K^{10})$ – условная вероятность того, что проверяемая операция при фактически правильном выполнении будет признана правильной (неправильной), причем $K^{11} + K^{10} = 1$.

– $K^{00}(K^{01})$ – условная вероятность того, что проверяемая операция при фактически неправильном выполнении будет признана неправильной (правильной), причем $K^{00} + K^{01} = 1$.

Приведенные вероятности могут зависеть от времени, в частности от количества повторов рабочей и контрольной операций [16]–[18]. Если же данные вероятности постоянны, то для оценки среднего числа повторов (циклов) в [4], [5] получена формула $M = 1/(\beta^1 K^{11} + \beta^1 K^{01})$, которую

удобно использовать в дальнейших расчетах при вычислении среднего числа повторов операций, а также нормированных коэффициентов стереотипности и логической сложности представленной на рис. 1 ТФС.

В [19], [20] показано, что как рабочая операция Р, так и контрольная операция К могут быть представлены в виде некоторых структур с соответствующими показателями числа операций, нормированных коэффициентов стереотипности и логической сложности $R_P(s_P, l_P, m_P)$, $R_K(s_K, l_K, m_K)$ и вероятностными характеристиками.

В этом случае, если вероятности не меняются, то используя для оценки среднего числа повторов приведенную выше формулу, можно получить оценки нормированных коэффициентов стереотипности, логической сложности и числа операций для укрупненной структуры Q_1 , приведенной на рис. 1:

$$\begin{aligned} s_{Q_1} &= \frac{s_P m_P + s_K m_K}{m_P + m_K}, \\ l_{Q_1} &= \frac{l_P m_P + l_K m_K}{m_P + m_K}, \\ m_{Q_1} &= \frac{m_P + m_K}{1 - (\beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00})} = \frac{m_P + m_K}{\beta^1 K^{11} + \beta^0 K^{01}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Замечание. Формулы (1) позволяют оценивать средневзвешенные значения, являющиеся нормированными коэффициентами стереотипности и логической сложности, при этом они справедливы и для нецелых значений числа повторов (m_Q).

2. Проведем анализ ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования, доработкой и повторением рабочей операции без ограничений на число повторов». Данная ТФС предполагает, что после выполнения некоторой рабочей операции P_1 реализуется контроль правильности ее выполнения К, в зависимости от результатов которого операция либо *считается* выполненной правильно, либо вносятся необходимые исправления P_2 , после чего операция выполняется повторно. Операция повторяется до тех пор, пока контроль не даст подтверждение, что она выполнена правильно. Число повторов не ограничено.

В соответствии с [4], [5] и др. данная ТФС также может быть представлена в виде укрупненной рабочей операции. Детализированное и укрупненное представление ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования, доработкой и повторением рабочей операции без ограничений на число повторов» приведены на рис. 2.

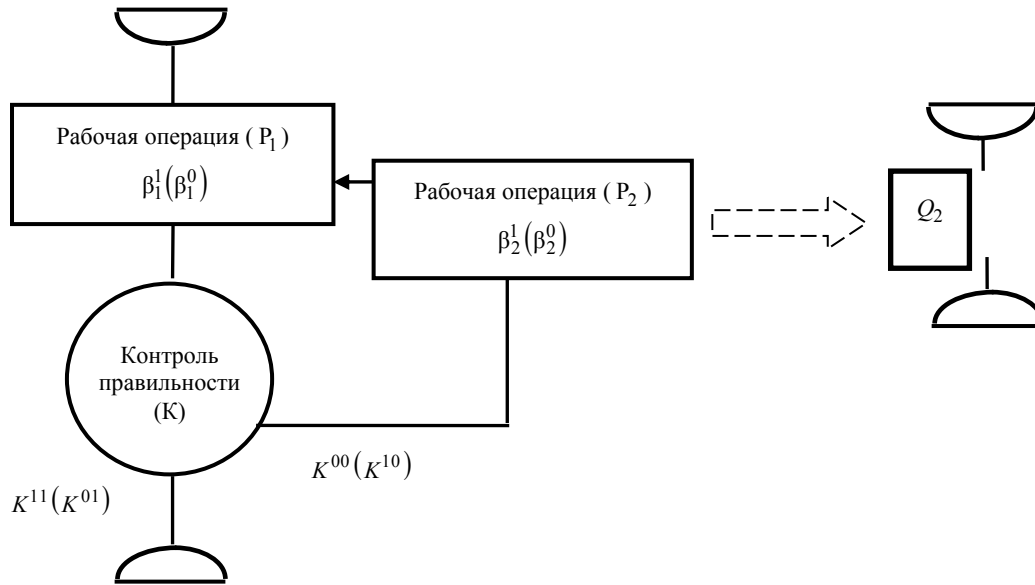


Рис. 2

В самой простой интерпретации можно полагать, что выполнение операции P_1 и контроля K однократно реализуется всегда, а если контроль K признал операцию P_1 выполненной неправильно, то реализуется выполнение операций P_2 , P_1 и K .

Полагая, что для этих операций известны их нормированные коэффициенты стереотипности и логической сложности, а также их длины $R_1(s_1, l_1, m_1)$, $R_K(s_K, l_K, m_K)$, $R_2(s_2, l_2, m_2)$, можно найти значения аналогичных параметров укрупненной структуры Q_2 :

$$m_{Q_2} = m_1 + m_K + (m_1 + m_K + m_2) \times \frac{\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}}{\beta_1^1 \beta_2^1 K^{11} + (1 - \beta_1^1 \beta_2^1) K^{01}},$$

$$s_{Q_2} = [s_1 m_1 + s_K m_K + (s_1 m_1 + s_K m_K + s_2 m_2) \times \frac{\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}}{\beta_1^1 \beta_2^1 K^{11} + (1 - \beta_1^1 \beta_2^1) K^{01}}] / m_{Q_2},$$

$$l_{Q_2} = [l_1 m_1 + l_K m_K + (l_1 m_1 + l_K m_K + l_2 m_2) \times \frac{\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}}{\beta_1^1 \beta_2^1 K^{11} + (1 - \beta_1^1 \beta_2^1) K^{01}}] / m_{Q_2}.$$

Заметим, что, как и в предыдущем случае, значение m_{Q_2} может быть нецелым, что не влияет на правильность результата.

3. Проведем анализ ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования, исправлениями и последующими контролями без ограничений на количество циклов». Данная ТФС предполагает, что после выполнения некоторой рабочей опера-

ции P_1 выполняется контроль правильности ее выполнения K , на основании результатов которого операция либо считается выполненной правильно, либо вносятся необходимые исправления P_2 , после чего контроль проводится повторно. Операция P_2 повторяется до тех пор, пока контроль не даст подтверждение, что она выполнена правильно. Число повторов не ограничено.

В соответствии с [4], [5] данная ТФС также может быть представлена в виде укрупненной рабочей операции. Детализированное и укрупненное представление ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования, исправлениями и последующим контролем без ограничений на количество циклов» приведены на рис. 3.

Очевидно, что выполнение операции P_1 и контроля K реализуется всегда, если же контроль K признал операцию P_1 выполненной неправильно, то реализуется (возможно, неоднократно) выполнение операций P_2 и K .

Как и ранее, полагая, что для всех операций известны их коэффициенты стереотипности и логической сложности, а также их длины $R_1(s_1, l_1, m_1)$, $R_K(s_K, l_K, m_K)$, $R_2(s_2, l_2, m_2)$, можно найти значения аналогичных параметров укрупненной структуры Q_3 :

$$m_{Q_3} = m_1 + m_K + (m_K + m_2) \frac{\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}}{\beta_2^1 K^{11} + \beta_2^0 K^{01}};$$

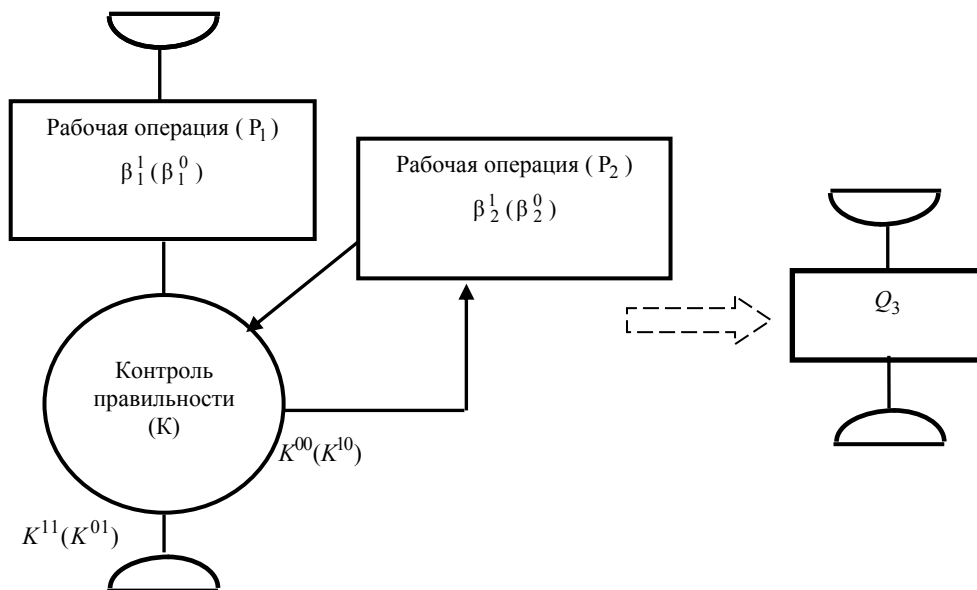


Рис. 3

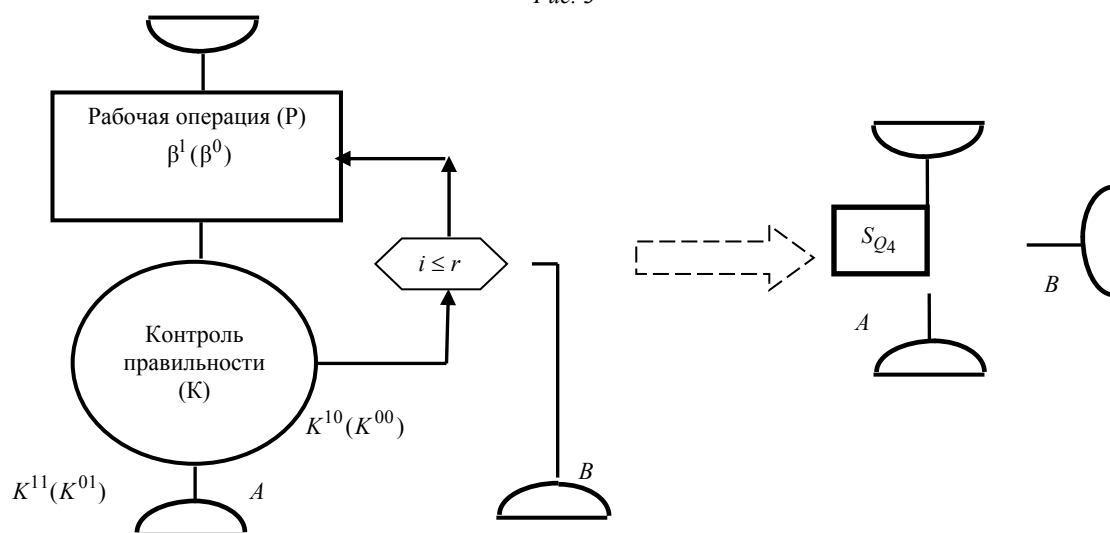


Рис. 4

$$s_{Q_3} = [(s_1 m_1 + s_K m_K) + (s_K m_K + s_2 m_2) \times \frac{\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}}{\beta_2^1 K^{11} + \beta_2^0 K^{01}}] / m_{Q_3};$$

$$l_{Q_3} = [(l_1 m_1 + l_K m_K) + (l_K m_K + l_2 m_2) \times \frac{\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}}{\beta_2^1 K^{11} + \beta_2^0 K^{01}}] / m_{Q_3}.$$

Аналогично случаям 1 и 2 значение m_{Q_3} также может быть нецелым числом.

4. ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования с ограничением на количество циклов». Вид детализированной и укрупненной структур приведен на рис. 4.

Вначале выполняется рабочая операция, а затем проводится контроль правильности ее вы-

полнения. Если контроль показывает, что операция выполнена неправильно, то она выполняется повторно. Операция повторяется до тех пор, пока контроль не подтвердит, что она выполнена правильно, или пока число повторов не станет предельно допустимым.

Укрупненная структура в соответствии с [4], [5] – рабочая операция с двумя выходами: A и B. При оценке стереотипности и логической сложности полагаем, что вероятности правильного и ошибочного выполнения операций постоянны.

Необходимо заметить, что выход A на рис. 4 означает, что решение задачи было *признано* правильным на основе результатов последней контрольной операции, но не означает, что данное решение действительно *было* правильным. Выход B ни разу не был признанной решенной правильно задачей и, следовательно, оператор обязан пе-

рейти к выполнению запасного (резервного) варианта действий.

Будем полагать, что, как и в случае 1, известны все необходимые для оценок характеристики рабочей P и контрольной K операций, т. е. нормированные коэффициенты стереотипности и логической сложности $R_P(s_P, l_P, m_P)$, $R_K(s_K, l_K, m_K)$ и вероятностные характеристики.

Принимая во внимание тот факт [4], [5], что среднее число циклов в данном случае равно

$$\begin{aligned} n_{Q_4} &= \\ &= \frac{1-(r+1)(\beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00})^r + r(\beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00})^{r+1}}{1-(\beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00})} = \\ &= \frac{1-(r+1)(\beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00})^r + r(\beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00})^{r+1}}{\beta^1 K^{11} + \beta^0 K^{01}}, \end{aligned}$$

выведем выражения для оценки коэффициентов стереотипности и логической сложности, а также длины укрупненной структуры Q_4 :

$$\begin{aligned} m_{Q_4} &= (m_P + m_K)n_{Q_4}, \quad s_{Q_4} = \frac{s_P m_P + s_K m_K}{m_P + m_K}, \\ l_{Q_4} &= \frac{l_P m_P + l_K m_K}{m_P + m_K}. \end{aligned}$$

Полученные выражения можно использовать для оценки коэффициентов стереотипности и логической сложности отдельных типовых фрагментов общего алгоритма деятельности.

5. ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования, доработкой и повторением рабочей операции с ограничением на количество циклов» [4], [5]. Вид детализированной и укрупненной структур приведен на рис. 5.

Вначале выполняется рабочая операция P_1 , результат которой затем подвергается проверке правильности выполнения K . Если контроль показывает, что операция выполнена неправильно, то вносятся необходимые исправления (производится доработка) P_2 , а затем операция P_1 выполняется повторно. Повторение проводится до тех пор, пока контроль не подтвердит, что операция выполнена правильно, или пока число повторов не превысит заданного предельно допустимого значения.

В соответствии с [4], [5] данная типовая структура в результате укрупнения может быть представлена в виде рабочей операции с двумя исходами. При оценке стереотипности и логической сложности будем полагать, что вероятности правильного и ошибочного выполнения всех элементарных операций постоянны.

Вновь следует отметить, что выход A означает, что решение задачи было *признано* правильным по результатам последней контрольной операции, но не означает, что это решение действительно *является* правильным. Выход B означает, что за отведенное число попыток задача не была решена правильно (т. е. решение задачи ни разу не было признано правильным) и, следовательно, оператор обязан перейти к выполнению запасного (резервного) варианта действий.

Полагая, что для обеих рабочих и контрольной операции, входящих в ТФС, известны их нормированные коэффициенты стереотипности и логической сложности, а также их длины $R_1(s_1, l_1, m_1)$, $R_K(s_K, l_K, m_K)$, $R_2(s_2, l_2, m_2)$, можно найти

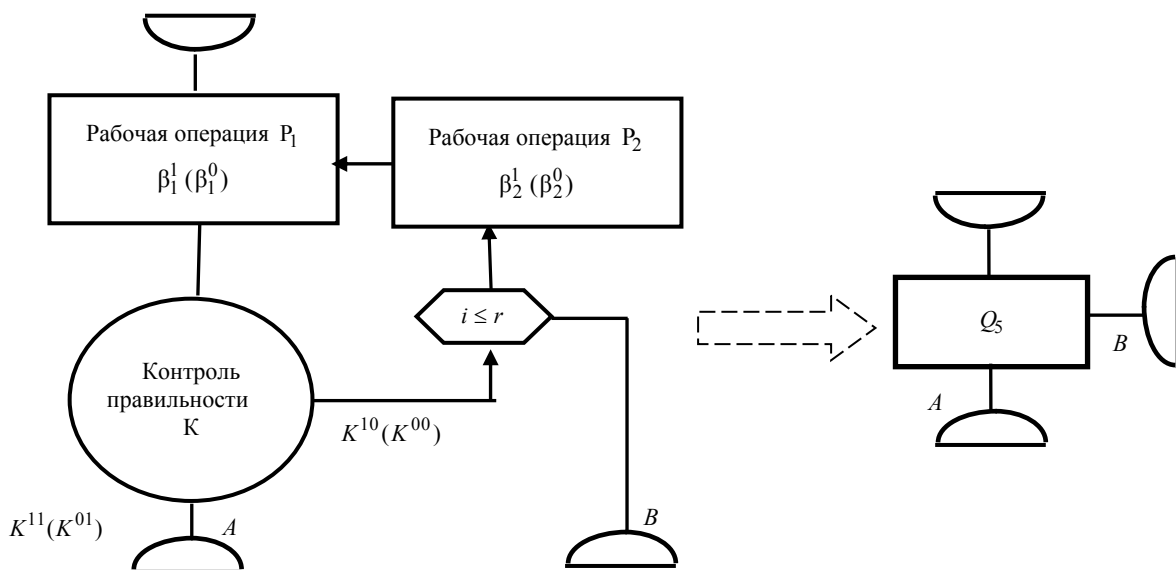


Рис. 5

значения аналогичных параметров укрупненной структуры Q_5 .

В данном случае среднее число циклов, без учета первого прохода, равно

$$n_{Q_5} = \left\{ 1 - r \left[\beta_1^1 \beta_2^1 K^{10} + (1 - \beta_1^1 \beta_2^1) K^{00} \right]^{r-1} + \right. \\ \left. + (r-1) \left[\beta_1^1 \beta_2^1 K^{10} + (1 - \beta_1^1 \beta_2^1) K^{00} \right]^r \right\} / \left\{ \beta_1^1 \beta_2^1 K^{11} + \right. \\ \left. + (1 - \beta_1^1 \beta_2^1) K^{01} \right\}.$$

Тогда для укрупненной структуры Q_5 получаем:

$$m_{Q_5} = m_1 + m_K + (m_1 + m_K + m_2) \times \\ \times (\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}) n_{Q_5}; \\ s_{Q_5} = \left[(s_1 m_1 + s_K m_K) + (s_1 m_1 + s_K m_K + s_2 m_2) \times \right. \\ \left. \times (\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}) n_{Q_5} \right] / m_{Q_5}; \\ l_{Q_5} = \left[(l_1 m_1 + l_K m_K) + (l_1 m_1 + l_K m_K + l_2 m_2) \times \right. \\ \left. \times (\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}) n_{Q_5} \right] / m_{Q_5}.$$

6. ТФС «Рабочая операция с контролем функционирования, доработкой и последующим контролем с ограничением на количество циклов» [4], [5]. Вид детализированной и укрупненной структур приведен на рис. 6.

Выполняется рабочая операция P_1 и проводится контроль правильности ее выполнения K . Если контроль показывает, что операция выполнена неправильно, то вносятся необходимые исправления P_2 и операция контроля повторяется снова. Операция исправления P_2 (доработки) повторяется

до тех пор, пока контрольная операция не признает, что операция доработки (исправления) выполнена правильно, или пока число повторов не превысит заданного предельного значения.

В соответствии с [4], [5] данная типовая структура может быть укрупнена и представлена в виде рабочей операции с двумя исходами. При оценке стереотипности и логической сложности будем полагать, что вероятности правильного и ошибочного выполнения обеих рабочих операций и операции контроля постоянны.

Выход A означает, что решение задачи было *признано* правильным по результатам последней контрольной операции, но не означает, что это решение *действительно* правильное. Выход B означает, что за отведенное число попыток задача не была решена правильно, и, следовательно, оператор обязан перейти к выполнению запасного (резервного) варианта действий.

Полагая, что для обеих рабочих и контрольной операции известны все требуемые для их корректного описания характеристики, выведем выражения для оценки коэффициентов стереотипности и логической сложности, а также длины укрупненной структуры Q_6 . В данном случае среднее число циклов без учета первого прохода равно

$$n_{Q_6} = \left[1 - r (\beta_2^1 K^{10} + \beta_2^0 K^{00})^{r-1} + \right. \\ \left. + (r-1) (\beta_2^1 K^{10} + \beta_2^0 K^{00})^r \right] / (\beta_2^1 K^{11} + \beta_2^0 K^{01}).$$

Тогда для укрупненной структуры Q_6 получаем:

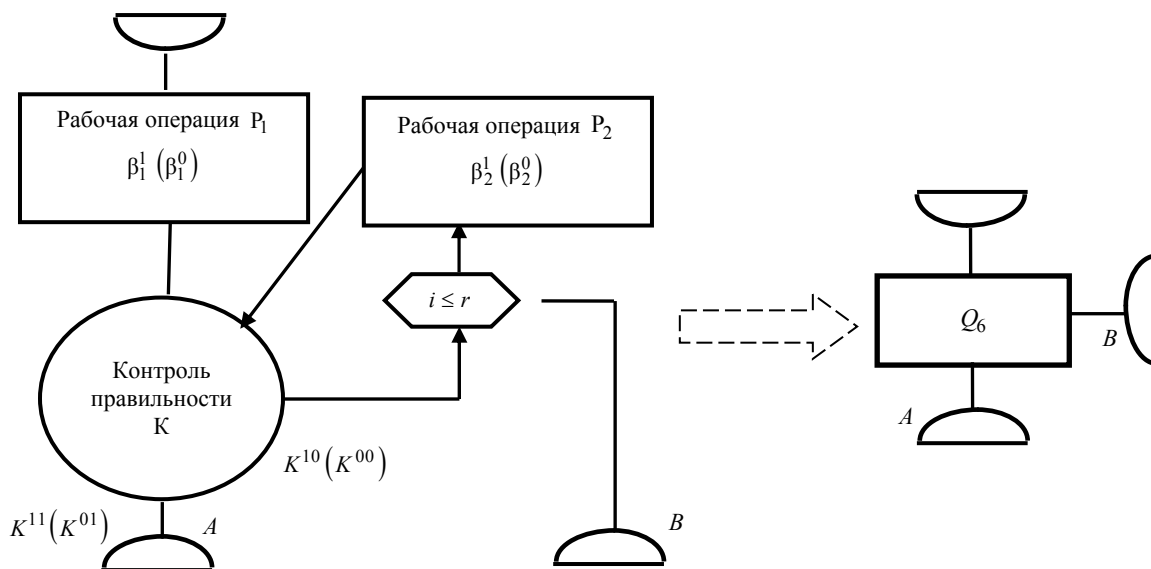


Рис. 6

$$\begin{aligned}
m_{Q_6} &= m_1 + m_K + (m_K + m_2) \times \\
&\quad \times (\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}) n_{Q_6}; \\
s_{Q_6} &= [(s_1 m_1 + s_K m_K) + (s_K m_K + s_2 m_2) \times \\
&\quad \times (\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}) n_{Q_6}] / m_{Q_6}; \\
l_{Q_6} &= [(l_1 n_1 + l_K n_K) + (l_K n_K + l_2 n_2) \times \\
&\quad \times (\beta_1^1 K^{10} + \beta_1^0 K^{00}) n_{Q_6}] / m_{Q_6}.
\end{aligned}$$

Замечания:

1. В настоящей статье рассмотрены лишь некоторые ТФС, но выражения для оценки значений коэффициентов стереотипности и логической сложности могут быть выведены и для не приведенных в данной статье ТФС.

2. При отсутствии точных значений вероятностных характеристик для отдельных блоков, входящих в состав рассмотренных ТФС, можно

считать целесообразным использование интервальных или нечетких оценок, например полученных в результате опроса экспертов.

Полученный комплекс формульных зависимостей для вычисления длин (размеров) и коэффициентов стереотипности и логической сложности отдельных фрагментов с циклической структурой является основой для метода поэтапной оценки основных характеристик алгоритмов деятельности оператора, позволяющего производить изменения в отдельных фрагментах, а также пересчет соответствующих оценок без пересчета остальных частей алгоритма. Благодаря этому может быть существенно уменьшен объем требуемых вычислений, а разработчики (проектировщики) получают реальную возможность моделировать различные виды фрагментов алгоритмов деятельности без лишних сложностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ РВ 29.04.002–84. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Алгоритм и структура деятельности оператора. Общие эргономические требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 8 с.

2. ГОСТ В 29.08.002–2005. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Показатели качества деятельности операторов образцов вооружения и военной техники статистические. Номенклатура. Методы определения. М.: Стандартинформ, 2006. 16 с.

3. Военная инженерная психология / Б. Ф. Ломов, А. А. Васильев, В. В. Офицеров, В. Ф. Рубахин. М.: Воениздат, 1970. 401 с.

4. Губинский А. И., Евграфов В. Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л.: Судостроение, 1977. 224 с.

5. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания / под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 512 с.

6. Падерно П. И., Попечителей Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем / под общ. ред. Е. П. Попечителя. СПб.: Элмор, 2007. 264 с.

7. Краснова А. И., Назаренко Н. А., Падерно П. И. Человеческий фактор в информационных системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 80 с.

8. Дмитриев М. С. Оценка сложности алгоритма деятельности операторов транспортно-технологических машин // Междунар. науч.-иссл. журн. 2016. Вып. № 12 (54), ч. 3. С. 83–87.

9. Овсянников В. Е., Васильев В. И. Оценка параметров алгоритмов работы операторов технологиче-

ского оборудования в условиях неопределенности исходных данных // Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. Машиностроение. 2014. № 2. С. 56–57.

10. Зараковский Г. М. Психофизиологический анализ трудовой деятельности (логико-вероятностный подход при изучении труда управляющего типа). М.: Наука, 1966. 114 с.

11. Суходольский Г. В. Структурно-алгоритмический анализ и синтез деятельности / ЛГУ. Л., 1976. 120 с.

12. Ротштейн А. П. Выбор условий деятельности человека на основе нечеткой перфектности // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 6. С. 109–121.

13. Падерно П. И., Смирнов А. В. Оценка безошибочности выполнения алгоритма дискретной деятельности при различных видах ошибок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 3. С. 13–18.

14. Падерно П. И., Павлухин И. С., Смирнов А. В. Развитие функционально-структурной теории для оценки качества деятельности операторов эргатических систем // Мехатроника, автоматика, управление. М. 2012. № 5 (134). С. 31–35.

15. Падерно П. И. Алгоритмы деятельности – описание и оценка // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. 2015. № 3. С. 37–40.

16. Краснова А. И., Балхарет А. А., Падерно П. И. Модель оценки времени выполнения задачи // Информационно-управляющие системы ГУАП. 2009. № 4. С. 72–74.

17. Балхарет А. А., Падерно П. И. Автоматизация оценки напряженности деятельности оператора // Биотехносфера. 2009. № 2/2. С. 53–56.

18. Балхарет А. А., Падерно П. И. Оценка времени выполнения задачи при изменении напряженности деятельности оператора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 5. С. 19–23.

19. Burkov E. A., Paderno P. I., Sopina O. P. Analysis and combination of activity algorithms evaluation methods // 2018 Third Intern. Conf. on Human Factors in

Complex Technical Systems and Environments (ERGO) and Environments (ERGO). SPb., 2018. P. 111–114.

20. Назаренко Н. А., Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Способ оценки логической сложности и стереотипности алгоритмов деятельности операторов // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 740–746.

N. A. Nazarenko, P. I. Paderno
Saint Petersburg Electrotechnical University

EVALUATION OF LOGIC COMPLEXITY AND STEREOTYPITY OF CYCLIC STRUCTURES IN OPERATOR ACTIVITY ALGORITHMS

The analysis of the evaluation of the algorithms of the operators in the process of designing man-machine systems. A new approach to assessing the coefficients of stereotype and logical complexity of activity algorithms having cycles (repeating a series of operations) is presented. The basic typical functional structures and corresponding calculation formulas for calculating the lengths (sizes) and stereotypicity coefficients and the logical complexity of individual fragments with a cyclic structure are shown. The proposed approach, being a tool for developing a human-machine system, greatly simplifies its computational activities, and makes it possible to evaluate the main characteristics of the algorithms of operator activity in stages. In addition, the representation of dependencies proposed within the framework of the approach facilitates understanding of the obtained intermediate and final estimates. The approach is the basis of the designed information module for supporting the activities of the developer in solving problems related to the evaluation of the algorithms of the operators of developed complex man-machine systems and complexes for various purposes.

Activity algorithm, logical complexity, stereotype, cyclic structures, operator, quality of activity algorithms, human-machine systems

УДК 004.514.62

М. Г. Пантелеев, А. Ф. Салимов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ алгоритмов навигации интеллектуального агента в виртуальном футболе

Проводится анализ различных методов решения навигационной задачи интеллектуальным агентом в среде виртуального футбола Robosoccer на основе зашумленных данных, поступающих от визуального сенсора. Рассмотрены две группы методов вычисления абсолютных координат объектов на основе сенсорных данных о флагах и линиях: тригонометрические методы и методы, основанные на использовании фильтра Калмана и фильтра частиц. Кратко описано инструментальное программное средство, разработанное для проведения экспериментальных исследований и позволяющее произвольно варьировать условия решения навигационной задачи. Представлены экспериментальные результаты сравнительного анализа быстродействия и точности алгоритмов, реализующих различные методы. Полученные результаты позволяют агенту решать навигационную задачу с использованием алгоритмов произвольного времени, разменивая время решения на качество (точность) результата. С учетом полученных результатов определены направления дальнейших исследований по реализации оценки тактической обстановки в виртуальном футболе.

Интеллектуальный агент, многоагентная система, виртуальный футбол, RoboCup Soccer, навигационная задача, алгоритмы произвольного времени, фильтр Калмана, фильтр частиц

Создание интеллектуальных агентов (ИА) и основанных на них многоагентных систем (МАС) является в настоящее время магистральным

направлением развития искусственного интеллекта [1], [2]. Под ИА понимаются автономные системы, воспринимающие окружающую среду и

реализующие в этой среде целенаправленное поведение. К важным особенностям ИА относятся их способность действовать группами, в том числе в условиях активного противодействия со стороны других групп агентов.

В последние годы в качестве эталонной платформы для отработки различных подходов к построению ИА реального времени (ИА РВ) и тактик группового поведения МАС в условиях группового противодействия используется виртуальный футбол [3]–[5]. Сообщество специалистов в области ИА и МАС поставлена амбициозная задача – к 2050 г. создать команду автономных роботов-футболистов, способных обыграть команду чемпионов мира.

Одной из важных задач, решаемых ИА, является навигация (определение собственного местоположения) на основе информации, поступающей от визуальных сенсоров. Для решения этой задачи широко используются вероятностные подходы, среди которых наиболее известны фильтр Калмана и фильтр частиц [6], [7]. Выбор наиболее эффективных методов и алгоритмов решения навигационной задачи с учетом особенностей конкретной среды функционирования ИА РВ требует их экспериментального сравнительного анализа.

Особенности навигационной задачи в среде виртуального футбола. Среда виртуального футбола (ВФ) RoboCup Soccer Server позволяет в реальном времени моделировать игру в футбол команд, состоящих из 11 автономных ИА. Каждый игрок реализуется как независимая программа, подключающаяся к серверу через UDP-сокеты. Сервер предоставляет виртуальное поле, на кото-

ром имитирует действия игроков в соответствии с поступающими от них командами. В каждом такте моделирования игрок получает от сервера сенсорную информацию и отправляет ему команды о собственных действиях.

Платформа ВФ моделирует важнейшие особенности реальных МАС – ограниченное поле зрения агентов, шумы восприятия (сенсорной информации) ИА и моделей движения игроков и мяча, ограниченная пропускная способность коммуникационных каналов и др.

Агент-футболист имеет три сенсора: визуальный, слуховой и сенсор тела. Основную информацию агент получает от визуального сенсора, которым он может управлять, задавая ширину и направление взгляда. При этом в каждый момент времени агент видит только часть поля. Частота получения визуальной информации от сервера зависит от выбранного агентом режима работы сенсора. На рис. 1 показан общий вид поля с расставленными на нем флагами (отмечены точками).

Флаги – это статические объекты с априори известными координатами, вследствие чего они могут наряду с линиями использоваться в качестве навигационных привязок.

Визуальный сенсор обеспечивает информацию обо всех попавших в зону видимости объектах среды: мяче (b), игроках (p), флагах (f), линиях (l) и воротах (g) [5].

Визуальная информация поступает от сервера в следующем базовом формате:

(see ObjName Distance Direction
DistChng DirChng BodyDir HeadDir),

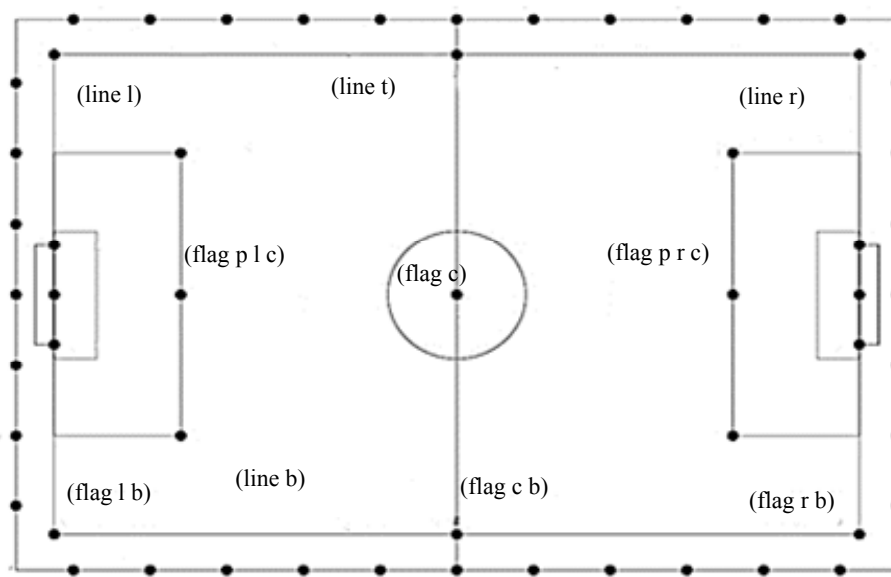


Рис. 1

где ObjName – тип/спецификатор видимого объекта; Distance – расстояние до объекта; Direction – направление на объект; DistChng – изменение расстояния; DirChng – изменение направления; BodyDir – направление тела; HeadDir – направление взгляда (головы).

Спецификаторы характеризуют объекты одного типа и задаются специальными символами после типа объекта. У полевых игроков спецификаторы указывают название команды и уникальный номер игрока.

Спецификаторы флагов определяют их положение на поле. Например, (f c) – флаг в центре поля; (f p l b) – флаг, отмечающий нижний угол (b – bottom) штрафной площади (p – penalty area) левой половины поля (l – left).

Пример кадра визуальной информации, поступающей от сервера, представлен ниже:

```
(see 0 ((f c) 32.4 0 0 0) ((f r t) 45.3 -4)
((f c t) 53.3 40) ((f p l t) 39.7 35) ((f p l c) 36.4 23)
((f t o) 62.3 -8) ((f t r 10) 59 5) ((f t r 20) 64.7 9)
((f t r 30) 63.3 17) ((f t r 40) 74 19) ((f t r 50)
82.6 28) ((f t l 10) 65.3 -17) ((f t l 20) 67.7 -26)
((f t l 30) 65 -32) ((f t l 40) 74.5 -44) ((f r t 20)
77.6 42) ((f r t 30) 85.6 34) ((b) 24.3 0 0 0)
((p «TeamName» 10) 43.1 32) ((l t) 63.4 66)).
```

Агент получает визуальную информацию о каждом наблюдаемом объекте в полярной системе координат, центром которой является он сам (т.е. азимут и расстояние до объекта). Используя эту относительную информацию и априорные знания координат статических объектов, он может вычислить собственные абсолютные координаты, а затем и абсолютные координаты других игроков.

В различные моменты времени (такты моделирования) в поле зрения агента в зависимости от его положения и направления взгляда оказываются различные навигационные привязки (флаги и линии). При этом количество таких привязок и расстояния до них варьируются в широких пределах. Так, игрок, смотрящий в сторону центра поля, видит намного больше навигационных привязок, чем игрок, стоящий в углу поля, взгляд которого направлен на ближайшую боковую линию.

Существенный фактор при решении навигационной задачи – неточность (зашумленность) получаемой от сервера сенсорной информации. В частности, шумы, накладываемые на расстояние до объекта, вычисляются сервером по следующей формуле:

$$Q_Distance = Quantize(\exp(Quantize(\ln(distance), quantizeStep)), 0.1),$$

где Q_Distance – воспринимаемое агентом расстояние до наблюдаемого объекта; distance – истинное расстояние до объекта; quantizeStep – шаг квантования.

Таким образом, для объекта, находящегося на расстоянии 1 м, погрешность определения расстояния может составлять 10 см, а при расстоянии 10 м – даже 1 м.

Задача определения абсолютных координат игроков (себя и других) по наблюдаемой информации может решаться разными методами и алгоритмами, отличающимися затрачиваемым временем и точностью решения.

В [2], [8]–[10] разработан подход к построению ИА РВ, в соответствии с которым агент в проблемных ситуациях динамически определяет имеющийся запас времени и адаптирует к нему процесс обдумывания решения. В рамках данного подхода алгоритмы решения частных задач строятся как *алгоритмы произвольного времени* (АПВ), в которых качество результатов (в частности, точность) зависит от выделяемого данному алгоритму времени. В рамках данного подхода решение навигационной задачи рассматривается с позиций АПВ. Для построения профилей АПВ, фиксирующих зависимость точности результата от выделяемого алгоритму времени, необходим сравнительный экспериментальный анализ различных методов решения навигационной задачи.

Методы навигации на основе тригонометрических моделей. На основе анализа литературы [6], [7] были выделены следующие методы решения навигационной задачи в среде ВФ:

- по ближайшему флагу и дальней линии;
- по двум ближайшим флагам;
- на основе фильтра Калмана;
- на основе фильтра частиц.

Навигация по ближайшему флагу и дальней линии. В данном случае сначала среди всех видимых объектов определяются ближайший флаг и дальняя линия. Направление игрока к линии используется для нахождения угла поворота головы агента. Пусть l_b – биссектриса угла обзора игрока, проходящая через его абсолютные координаты. Если в поле зрения игрока попала линия l , полученное им визуальное сообщение будет содержать расстояние d до точки пересечения l_b с l и угол α между l_b и l (рис. 2).

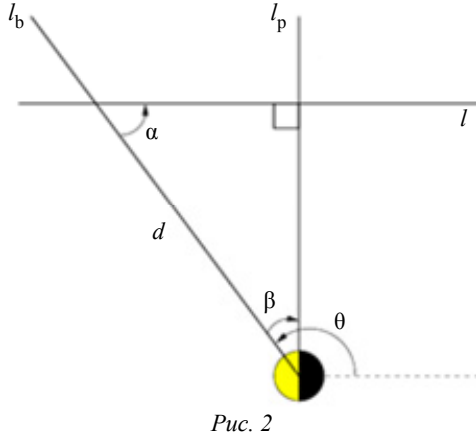


Рис. 2

При этом угол α будет равен углу поворота l_b до совпадения с l , имеющему положительное значение при вращении по часовой стрелке и отрицательное – в противном случае.

Для получения угла поворота головы θ игрока необходимо вычислить угол β между линиями l_b и l_p , перпендикулярной к l . Угол β вычисляется по следующей формуле:

$$\beta = -\text{sign}(\alpha)(90 - |\alpha|).$$

Вычислив угол θ , можно перейти к обработке информации о флаге. Сенсорная информация о флаге f включает направление f_ϕ на него относительно угла поворота головы игрока и расстояние f_r до него. Поскольку агенту априори известны абсолютные координаты (f_x, f_y) всех флагов, он может с учетом относительной сенсорной информации вычислить свои абсолютные координаты (p_x, p_y) . Для этого необходимо сначала выполнить поворот на угол θ в полярной системе координат. Абсолютные координаты игрока (p_x, p_y) можно получить преобразованием полярных координат в декартовы:

$$(p_x, p_y) = (f_x, f_y) - \pi(f_r, f_\phi + \theta),$$

где π – функция преобразования полярных координат в декартовы:

$$(x, y) = \pi(r, \phi) = (r \cos(\phi), r \sin(\phi)).$$

Навигация по двум ближайшим флагам и дальней линии. В данном алгоритме сначала определяются два ближайших флага среди всех видимых. Знание абсолютных координат флага и расстояния до него задает круг возможных позиций агента с центром в точке расположения флага и радиусом, определяемым расстоянием до него. Аналогично определяет круг возможных позиций агента и вто-

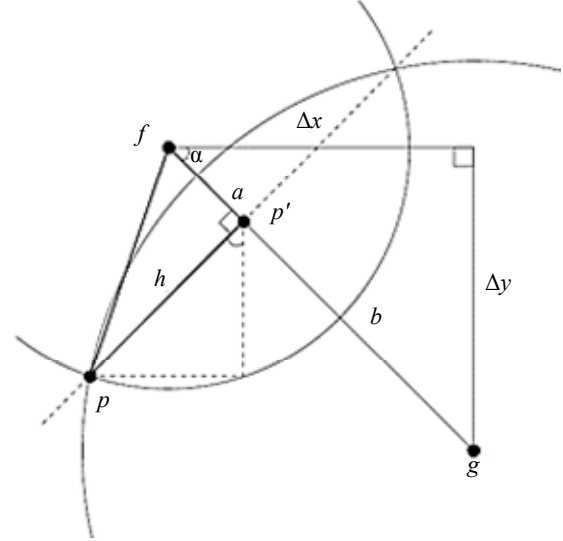


Рис. 3

рой флаг. Положение агента, очевидно, определяется пересечением этих окружностей (рис. 3).

Для однозначного определения точки необходимо вычислить расстояние d между флагами f и g , используя их абсолютные координаты:

$$d = \sqrt{(g_x - f_x)^2 + (g_y - f_y)^2}.$$

Расстояние d , как видно на рис. 3, складывается из отрезков $[f, p']$ и $[p', g]$. На рис. 3 обозначены: a – расстояние от флага f до точки p' ; b – расстояние от точки p' до флага g ; h – расстояние от точки p до точки p' . Для треугольников gpp' и fpp' можно записать:

$$\begin{cases} f_r^2 = a^2 + h^2; \\ g_r^2 = b^2 + h^2. \end{cases} \quad (1)$$

Учитывая соотношение $b = (d - a)$, можно вычислить значение a :

$$a = \frac{f_r^2 - g_r^2 + d^2}{2d}.$$

Тогда абсолютные координаты точки p' определяются следующим образом:

$$(p'_x, p'_y) = (f_x + a \cos(\alpha), f_y + a \sin(\alpha)).$$

Значения $\cos(\alpha)$ и $\sin(\alpha)$ определяются из соотношений:

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta y}{d}, \quad \cos(\alpha) = \frac{\Delta x}{d}.$$

Исходя из этого, абсолютные координаты игрока p будут равны:

$$(p_x, p_y) = (p'_x - h \operatorname{sign} \sin(\alpha), p'_y + h \operatorname{sign} \cos(\alpha)),$$

где, исходя из (1), $h = \sqrt{f_r^2 - a^2}$.

Истинное местоположение игрока можно определить с помощью знака sign : при положительном значении разности $(g_\phi - f_\phi)$ знак $\operatorname{sign} = +1$, в противном случае $\operatorname{sign} = -1$.

Использование только тригонометрических соотношений может приводить к большим ошибкам, значительно варьирующимся в различных ситуациях. Более точные решения навигационной задачи можно получить с применением подходов, основанных на фильтрации.

Методы навигации с использованием фильтрации. При определении абсолютных координат агента на футбольном поле тригонометрическими методами используется визуальная информация, полученная только в текущем такте. Вместе с тем, информацию о некотором объекте, получаемую в разных сенсорных тактах, можно рассматривать как последовательные наблюдения динамического процесса.

В подходах, использующих идеи фильтрации, состояния (координаты) агента рассматриваются как управляемый марковский процесс со скрытыми состояниями $x_t \in X \subset R_q$ и временным шагом t [11].

Обозначим x_0 – начальное состояние игрока, $P(x_0)$ – первоначальное распределение в момент времени $t = 0$. Тогда динамика игрока, реализуемая сервером, может рассматриваться как стохастическая модель переходов $P(x_{t+1}|x_t, a_t)$, в которой агент своими действиями a_t , совершаемыми в момент времени t , меняет свое состояние x_t на состояние x_{t+1} . Будем полагать сенсорные данные y_t , отправляемые сервером в каждом такте, условно независимыми относительно x_t . Тогда задачу навигации можно свести к оценке апостериорной плотности вероятности $P(x_t|y_t)$ в пространстве состояний X , описывающем текущее состояние агента в момент времени t . По правилу Байеса можно записать:

$$P(x_{t+1} | y_{t+1}) \propto P(y_{t+1} | x_{t+1}) P(x_{t+1}), \quad (2)$$

где априорная функция плотности вероятности $P(x_{t+1}|y_{t+1})$ соответствует апостериорной функции от последнего шага времени. Для $P(x_{t+1})$ можно записать

$$P(x_{t+1}) = \int P(x_{t+1} | x_t) P(x_t | y_t) dx_t. \quad (3)$$

В данной формуле используется марковское предположение о независимости текущих значений от предыдущих временных шагов.

Уравнения (2) и (3) позволяют построить итерационную схему байесовской фильтрации, в которой для аналитического определения апостериорной вероятности необходимо вычислять интеграл согласно (3). Результат вычисления необходимо домножить на значения плотности вероятности $P(y_{t+1}|x_{t+1})$, после чего нормировать плотность вероятности $P(x_{t+1}|y_{t+1})$. Апостериорные вероятности могут быть вычислены аналитически, если модели наблюдения и перехода линейно гауссовы. Поскольку среда моделирования Robocup Soccer не удовлетворяет этому требованию, необходимо использовать аппроксимации.

Эффективным методом вычисления апостериорных распределений в байесовской фильтрации является фильтр частиц [7]. Он основан на дискретной аппроксимации непрерывной функции апостериорной плотности (2) с использованием набора частиц x_t^i с соответствующими весами π_t^i , где $i = 1, \dots, N$. Эмпирическая апостериорная оценка имеет вид

$$P(x_t | y_t) = \sum_{i=1}^N \pi_t^i \delta(x_t - x_t^i). \quad (4)$$

Используя (4), интеграл для вычисления (3) можно заменить суммированием:

$$P(x_{t+1}) = \sum_{i=1}^N \pi_t^i P(x_{t+1} | x_t^i).$$

После замены всех интегралов на суммы и всех непрерывных функций плотности на дискретные выражения нормирование фиксированной апостериорной функции сведется к нормированию дискретных значений на единицу суммы:

$$P(x_{t+1} | y_{t+1}) \propto P(y_{t+1} | x_{t+1}) \sum_{i=1}^N \pi_t^i P(x_{t+1} | x_t^i).$$

Навигация с использованием фильтра Калмана. Фильтр Калмана позволяет получать оценку вектора состояния объекта (в данном случае – координат игрока) на основе серии зашумленных измерений.

Решение навигационной задачи в ВФ с использованием фильтра Калмана укрупнено включает следующие шаги:

1. Разбор и анализ принятой визуальной информации с целью получения списка видимых игроку флагов и их относительных координат.

2. Циклическая обработка всевозможных пар флагов. В каждом цикле выбираются два вида флагов и вычисляются абсолютные координаты агента по этим флагам.

3. Вычисление дисперсии ошибки сенсора (качество оценки дисперсии определяет качество работы фильтра Калмана):

$$\sigma_{i+1}^2 = \frac{(r_{\max} - r_{\min})^2}{12},$$

где $r_{\max}$ и $r_{\min}$ – максимально и минимально возможные значения расстояния; σ^2 – дисперсия ошибки.

4. Обновление значения коэффициента усиления Калмана (К) с учетом полученной дисперсии. Значение коэффициента должно обеспечивать максимальную близость вычисляемых оптимальных значений абсолютных координат к их истинным значениям:

$$K = \frac{\hat{\sigma}_i^2}{\hat{\sigma}_i^2 + \hat{\sigma}_{i+1}^2}.$$

5. Коррекция с помощью коэффициента Калмана оценочного значения абсолютных координат агента в данной итерации:

$$\hat{x}_{i+1} = \hat{x}_i + K(y_i - \hat{x}_i).$$

Навигация с использованием фильтра частиц. Фильтр частиц является методом определения абсолютных координат агента, в соответствии с которым для оценки координат создается множество гипотез (частиц) об их текущих значениях.

Алгоритм определения абсолютных координат на основе фильтра частиц включает пять шагов: *инициализация, прогноз, коррекция* (вычисление весовых коэффициентов и ресэмплинг), *оценка состояния*.

Инициализация фильтра частиц выполняется в момент приема первого сенсорного кадра и сводится к генерации частиц случайным образом вокруг полученной точки. В результате в окрестности точки генерируется N частиц с изначально равными весами.

Положение каждой частицы определяется на основе полученной от визуального сенсора информации о траектории и расстоянии. На этапе прогнозирования учитывается диапазон возможных значений расстояния до агента. Если расстояние между частицей и агентом находится вне этого диапазона значений, частица удаляется из набора. Таким образом после этапа прогнозиро-

вания с учетом информации о диапазоне значений из начального набора из N частиц остается K частиц. Возможны случаи, когда из общего набора могут быть удалены все частицы ($K = 0$). Такие ситуации возникают при резкой смене направления движения игрока, слишком большом интервале между измерениями и некоторых других факторах. В таких случаях сетка частиц инициализируется заново.

Процедура коррекции выполняется каждый раз при получении новой сенсорной информации и включает два шага: определение диапазонов значений и *ресэмплинг*.

Перед вычислением диапазона значений некоторые частицы могут быть удалены с использованием калмановской фильтрации. Каждый раз при получении новой информации определяются верхняя и нижняя границы расстояний между частицами и агентом. Частицы, оказавшиеся по результатам прогнозирования вне диапазона, удаляются из общего набора частиц.

Это позволяет отбросить заведомо ложные гипотезы о возможном положении объекта и тем самым сократить вычислительные затраты и повысить точность результата. После нескольких шагов процедуры коррекции у большинства частиц, соответствующих ошибочным гипотезам, веса могут стать близкими к нулю. Такие частицы практически не вносят вклад в финальную оценку вектора состояния, однако на них тратятся вычислительные ресурсы. Процедура ресэмплинга позволяет перераспределить вычислительные ресурсы, отбрасывая частицы с малым весом и дублируя частицы, имеющие большой вес.

На последнем этапе оценки состояния абсолютные координаты агента рассчитываются как взвешенная сумма состояний всех частиц.

Подход и результаты экспериментальной оценки алгоритмов навигации. Для экспериментального исследования и сравнительного анализа эффективности различных алгоритмов навигации разработана инструментальная программа на языке Java, позволяющая:

- произвольным образом позиционировать агента на поле и задавать направление и режим работы его визуального сенсора;

- решать навигационную задачу разными методами и оценивать точность решения и затраченное время.

Пользовательский интерфейс разработанной программы представлен на рис. 4.

RoboSoccer Client

File Edit Settings

Information Results

Point X: Point Y: Neck Angle: View Angle:

Received Visual Information

(see 0 ((f c) 21.1 15 0 0) ((f c b) 51.4 43) ((f r b) 83.1 6) ((f g r b) 70.8 -12) ((g r) 69.4 -17) ((f g r t) 68 -23) ((f p r b) 62.2 5) ((f p r c) 53 -14) ((f p r t) 53 -14))

Navigation bindings

Name of landmark	Distance	Direction
Flag f c	21.100000381469727	15.0
Flag f c b	51.400001525878906	43.0
Flag f p r t	51.400001525878906	-36.0
Line r	78.30000305175781	60.0

Algorithms

Name of algorithms	Point X:	Point Y:	Time:	Average Error
1 flag and 1 line	-14.919953352775984	-14.919953352775982	0.066244	0.11320305412669934
2 closest flags	-14.524545646644011	-15.305149128857813	0.055981	0.5649538325985974
Kalman Filter	-14.928480109401432	-15.03031707334602	0.568211	0.0776802400067031
Particle Filter	-14.974136975878473	-14.990553153247912	4.673976	0.02753432276755914

Рис. 4

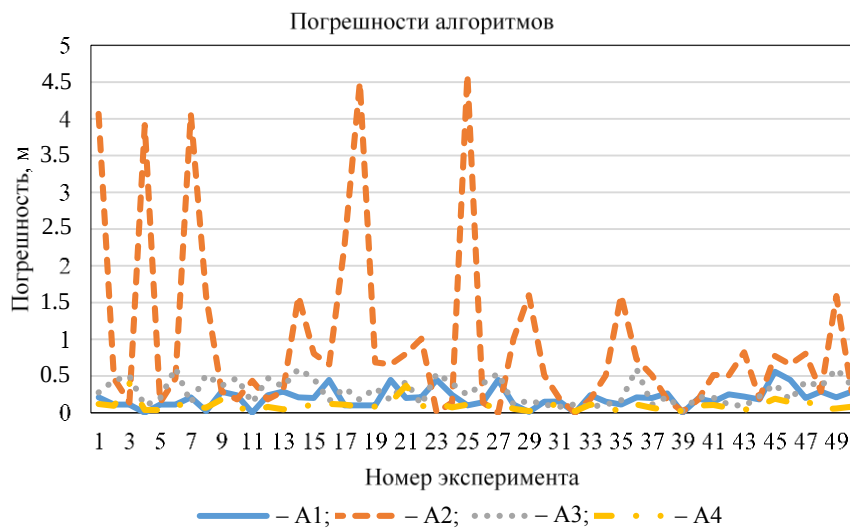


Рис. 5

Поскольку количество навигационных привязок (флагов), попадающих в поле зрения агента, существенно зависит от угла обзора, эксперименты проводились отдельно для разных углов обзора: узкого (narrow), нормального (normal) и широкого (wide). Результаты исследования при узком угле обзора, когда агент видит мало флагов, представлены на рис. 5.

Погрешности алгоритмов вычислялись при различных 50 абсолютных координатах. Графики на рисунке соответствуют следующим алгоритмам вычисления абсолютных координат агента: A1 – по ближайшему флагу и дальней линии; A2 – по двум ближайшим флагам; A3 – с исполь-

зованием фильтра Калмана; A4 – с использованием фильтра частиц.

Как видно из приведенных зависимостей, наибольшую ошибку дает алгоритм определения координат по двум ближайшим флагам. Наиболее точен метод на основе фильтра частиц, поскольку он использует информацию обо всех видимых флагах с учетом последовательности наблюдений.

Результаты экспериментальной оценки времени реализации алгоритмов представлены на рис. 6. Эксперименты проводились на ПЭВМ со следующими характеристиками: 2 ядра, 4 логических процессора, частота 2.2 ГГц.

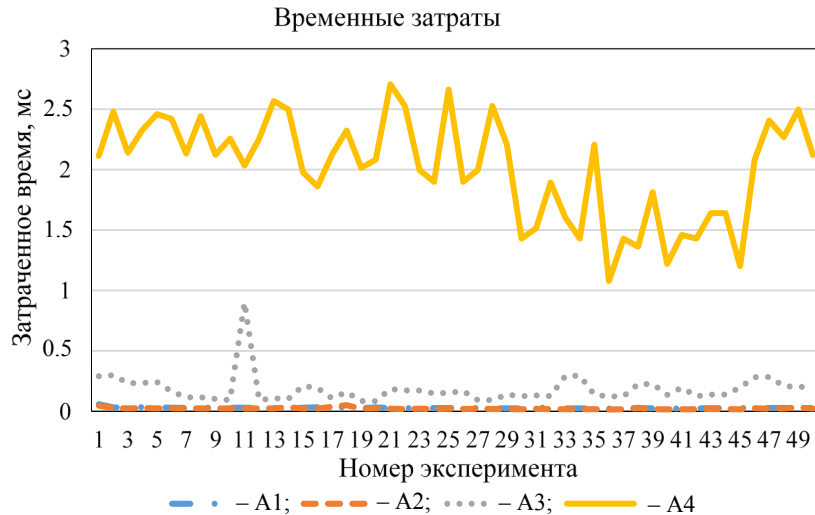


Рис. 6

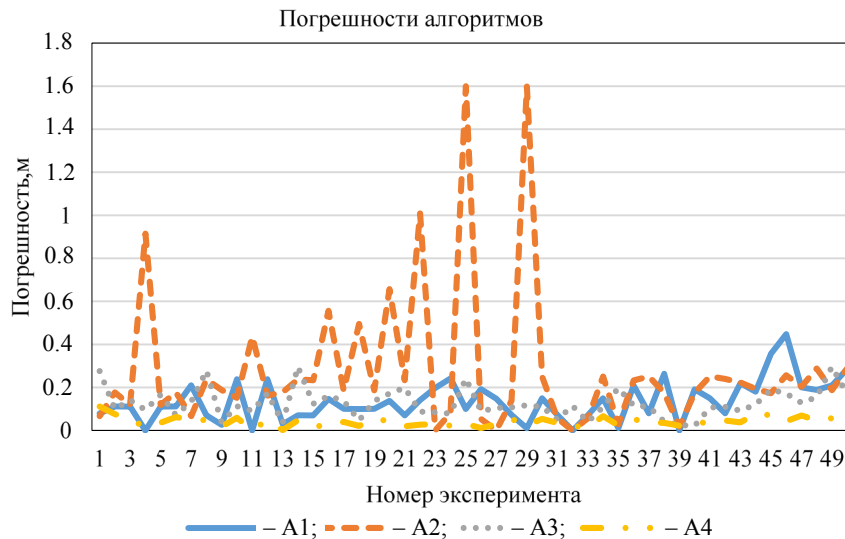


Рис. 7

Как показал эксперимент, алгоритм с использованием фильтра частиц работает в 7...15 раз медленнее других алгоритмов, что обусловлено большим числом операций обработки.

Усредненные значения ошибки определения абсолютных координат агента и затрат времени для разных алгоритмов при узком угле обзора представлены в сводной табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм определения абсолютных координат агента	Средняя ошибка, м	Время выполнения, мс
По ближайшему флагу и дальней линии	0.2482	0.0274
По двум ближайшим флагам	1.0154	0.0222
На основе фильтра Калмана	0.2901	0.1826
На основе фильтра частиц	0.0974	2.0154

Анализ полученных результатов показывает, что по совокупности двух характеристик – точности и времени – предпочтителен алгоритм определения абсолютных координат агента *по ближайшему флагу и дальней линии*. Данный алгоритм по затратам времени незначительно уступает наиболее быстродействующему алгоритму определения координат по двум ближайшим флагам и, вместе с тем, дает ошибку, сопоставимую с алгоритмом на основе фильтра Калмана.

Основным режимом работы визуального сенсора агентов, установленным в среде ВФ по умолчанию, является режим нормального угла обзора (*normal*). При данном режиме в поле зрения агента попадает больше навигационных привязок, чем в режиме *narrow*.

Результаты экспериментальных исследований погрешностей алгоритмов навигации в режиме визуального сенсора *normal* представлены на

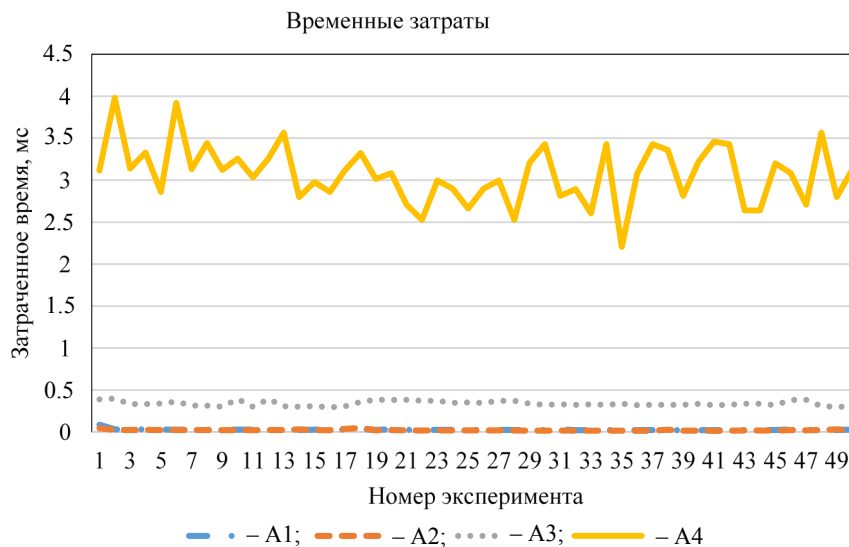


Рис. 8

рис. 7. Как видно из графиков, погрешность алгоритма определения координат по двум ближайшим флагам существенно (в два и более раз) снизилась, однако в отдельных случаях сохраняются резкие выбросы значений ошибки. Как показал анализ, такие выбросы соответствуют ситуации, когда два ближайших флага имеют близкий азимут, т. е. угол между ними мал (близок к нулю).

Результаты измерений времени работы навигационных алгоритмов при нормальном угле обзора представлены на рис. 8. Усредненные значения ошибки определения абсолютных координат и затрат времени для разных алгоритмов при данном режиме работы визуального сенсора представлены в сводной табл. 2.

Таблица 2

Алгоритм определения абсолютных координат агента	Средняя ошибка, м	Время выполнения, мс
По ближайшему флагу и дальней линии	0.1851	0.0280
По двум ближайшим флагам	0.2991	0.0264
На основе фильтра Калмана	0.1474	0.3398
На основе фильтра частиц	0.0403	3.0734

Анализ результатов показывает, что алгоритмы определения координат по ближайшему флагу и дальней линии и по двум ближайшим флагам имеют практически одинаковую временную сложность. При этом первый из них обеспечивает точность результата более чем в 1.5 раза выше, чем алгоритм с использованием двух ближайших флагов.

Вместе с тем, у алгоритма на основе фильтра частиц результаты более чем в 4 раза точнее, чем

у алгоритма на основе ближайшего флага и дальней линии. Однако данный алгоритм – наиболее медленный и тратит примерно на порядок больше времени, чем алгоритм на основе фильтра Калмана.

Сопоставление табл. 1 и 2 показывает, что при нормальном угле обзора точность алгоритмов в 1.8–2.2 раза выше, чем при узком угле обзора. При этом время вычисления координат на основе тригонометрических методов практически не изменилось. Вместе с тем, времена работы алгоритмов, основанных на фильтрации, вследствие увеличения количества видимых флагов выросли более чем в 1.5 раза.

В режиме широкого угла обзора (wide) в область видимости агента попадает максимальное число флагов и линий. Результаты экспериментальной оценки погрешности различных алгоритмов определения абсолютных координат агента для данного режима визуального сенсора представлены на рис. 9.

График погрешностей алгоритма определения координат на основе двух ближайших флагов на данном рисунке сглажен – удалены резкие выбросы, обусловленные близостью флагов по азимуту. Как видно из графиков, минимальную погрешность обеспечивает алгоритм на основе фильтра частиц, при этом он характеризуется минимальной дисперсией ошибки.

Результаты оценки времени работы навигационных алгоритмов при широком угле обзора агента представлены на рис. 10.

В табл. 3 приведены усредненные значения ошибок определения абсолютных координат и затрат времени для разных алгоритмов при дан-

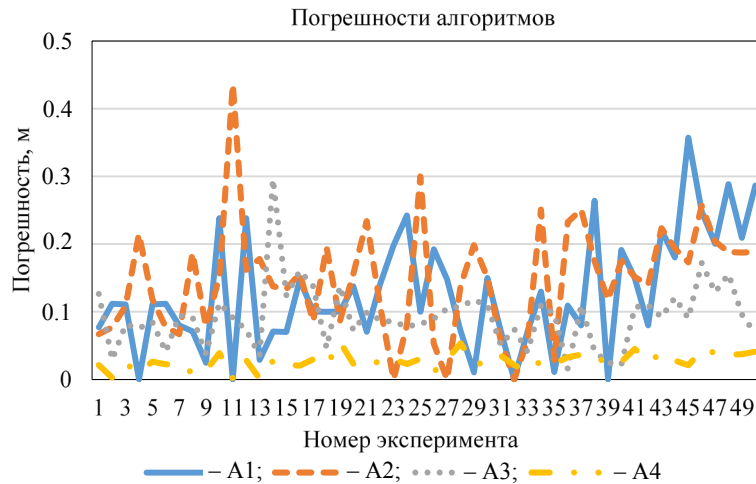


Рис. 9

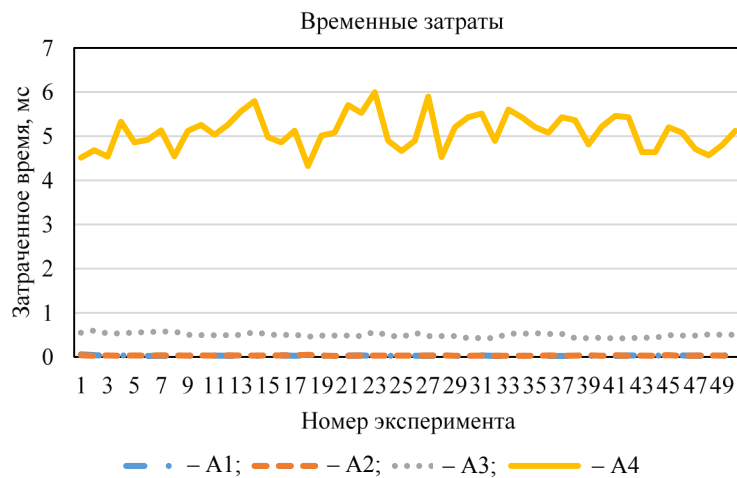


Рис. 10

ном режиме работы визуального сенсора. Как видно из сравнения данных результатов с результатами, полученными для нормального угла обзора, погрешность вычисления координат при широком угле обзора уменьшается на 20–40 %. При этом время выполнения алгоритмов увеличивается для разных методов от 5 до 60 %.

Таблица 3

Алгоритм определения абсолютных координат агента	Средняя ошибка, м	Время выполнения, мс
По ближайшему флагу и дальней линии	0.1680	0.0288
По двум ближайшим флагам	0.2472	0.0309
На основе фильтра Калмана	0.0927	0.4954
На основе фильтра частиц	0.0263	5.0974

По критерию точности решения навигационной задачи в ВФ лучшим является алгоритм, основанный на фильтре частиц. Однако он требует максимальных временных затрат (в среднем

4 мс). Тригонометрические алгоритмы определения абсолютных координат быстрые, но имеют значительно более низкую точность, существенно зависящую от количества видимых флагов и выбранного качества работы визуального сенсора. Кроме того, данные методы могут давать anomalously высокие ошибки при близких азимутах направления на ближайшие флаги.

Наличие различных алгоритмов решения навигационной задачи, отличающихся временем работы и точностью результата, позволяет рассматривать их с позиций АПВ и адаптировать процесс обдумывания агентом решения с учетом динамически (ситуативно) меняющихся временных ограничений. Таким образом, направлениями дальнейших исследований являются:

- построение уточненных профилей АПВ решения навигационной задачи и их использование в архитектуре ИА РВ для среды ВФ;
- использование вычисленных абсолютных координат игроков для определения тактических расстановок команд в процессе игры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. 1408 с.
2. Пантелеев М. Г., Пузанков Д. В. Интеллектуальные агенты и многоагентные системы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 215 с.
3. Официальный сайт турнира Robocup. URL: <http://www.robocup.org> (дата обращения 10.09.2019).
4. Футбольный сервер Robocup. URL: <https://github.com/rcsoccersim/rcssserver/> (дата обращения 10.09.2019).
5. Руководство пользователя Robocup Soccer. URL: <https://rcsoccersim.github.io/manual/> (дата обращения 10.04.2019).
6. Thrun S., Wolfram B., Fox D. Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents). The MIT Press, 2005. 672 p.
7. Московский А. Д. Неоднозначные модели в задаче локализации мобильного робота // 5-й Всерос. науч.-практ. семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019): тр. семинара. Переславль-Залесский: РАИИ, 2019. С. 9–18.
8. Пантелеев М. Г. Концепция построения интеллектуальных агентов реального времени на основе модели опережающего итеративного планирования // Тр. 13-й Нац. конф. по ИИ с междунар. участием КИИ-2012. Т 3. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. С. 25–33.
9. Пантелеев М. Г. Формальная модель опережающего итеративного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени // Тр. 14-й Нац. конф. по ИИ с междунар. участием КИИ-2014. Т. 1. Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. С. 323–333.
10. Panteleev M. G. Advanced Iterative Action Planning for Intelligent Real-Time Agents // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 150. P. 244–252.
11. Kok J. R., de Boer R. The Incremental Development of a Synthetic Multi-Agent System: The UvA Trilearn 2001 Robotic Soccer Simulation Team, M. S. Master thesis. Netherlands: University of Amsterdam, 2002. 217 с.

M. G. Panteleyev, A. F. Salimov
Saint Petersburg Electrotechnical University

ANALYSIS OF INTELLIGENT AGENT'S NAVIGATION ALGORITHMS IN A VIRTUAL FOOTBALL

The analysis of various methods of solving the navigation problem by an intelligent agent in the environment of virtual football Robosoccer on the basis of noisy data coming from a visual sensor. Two groups of methods for calculating the absolute coordinates of objects based on sensory data about flags and lines are considered: trigonometric methods and methods based on the use of the Kalman filter and the particle filter. The instrumental software tool developed for carrying out experimental researches and allowing to vary arbitrarily conditions of the decision of a navigation problem is briefly described. Experimental results of the comparative analysis of the speed and accuracy of algorithms implementing various methods are presented. The obtained results allow the agent to solve the navigation problem using algorithms of arbitrary time, exchanging the solution time for the quality (accuracy) of the result. Taking into account the obtained results, the directions of further research on the implementation of the assessment of the tactical situation in virtual football are determined.

Intelligent agent, multi-agent system, virtual soccer, RoboCup Soccer, navigation task, arbitrary time algorithms, Kalman filter, particle filter

УДК 681.515.6 + 621.865

М. П. Белов, Д. Д. Чыонг, Н. В. Лань

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Разработка математической модели и управление методом разделения закона управления для экзоскелета

Исследуется возможность применения нелинейного регулятора, построенного на основе метода децентрализованного управления электроприводом экзоскелета, позволяющего исключить все нелинейные компоненты и перекрестные связи. К значительным проблемам в алгоритмах управления относится конструкция линейных регуляторов для нелинейных систем. Экзоскелет – это мощный нелинейный объект управления со многими неопределенными параметрами, поэтому применение традиционных методов управления чрезвычайно трудно. Для упрощения используется нелинейный регулятор, построенный на основе метода децентрализованного управления. Однако для применения этого метода требуется построение точной кинематической модели объекта для обеспечения необходимого крутящего момента. Рассматривается процесс построения модели динамики движения на примере двухсуставного модуля нижней конечности экзоскелета с возмущениями. В соответствии с требованиями управления построен регулятор экзоскелета с высокой точностью и энергосбережением. Выполнено моделирование регулятора экзоскелета в среде Matlab & Simulink.

Экзоскелет, динамика движения, математическая модель, электропривод, мехатронная система, структурный экзоскелет, управление экзоскелета, разделения закона управления

В настоящее время для помощи людям с ограниченными возможностями применяются медицинские экзоскелеты. Для улучшения качества управления ими чрезвычайно важны исследование и разработка математических моделей экзоскелета, подерживающего нижние конечности человека.

Экзоскелет – это многозвенная система, в которой каждым звеном можно управлять отдельно, обеспечивая все степени свободы его движения [1], [2]. Если звенья двигаются совместно, то управление электроприводом экзоскелета (ЭПЭ) строится с учетом ограничения взаимного влияния электромеханических процессов. Для управления эффективностью ЭПЭ используется детализированная математическая модель, учитывающая влияние внутренних и внешних возмущений. Для ее составления используется метод децентрализованного управления, который имеет много преимуществ по сравнению с другими методами управления нелинейными объектами.

Модель динамики экзоскелета. Для построения подробной модели динамики экзоскелета предлагается подход, основанный на использовании уравнений Лагранжа–Максвелла и компьютерных технологий исследования многозвенных мехатронных систем. Модель нижней конечности экзоскелета представляет собой многозвенный механический робот, положение системы которого определяется n обобщенными координатами $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, где правая часть уравнения – это компоненты вектора обобщенных координат механической системы, являющиеся радиус-векторами каждого звена механической системы.

Для оценки предлагаемого регулятора используется экзоскелет 2-го сустава для восстановления нижней конечности. Этот экзоскелет может выполнять терапевтические упражнения на тазобедренном и коленном суставах человеческой ноги. Рис. 1 иллюстрирует схему представления системы «человек–робот», где с увеличением показаны различия

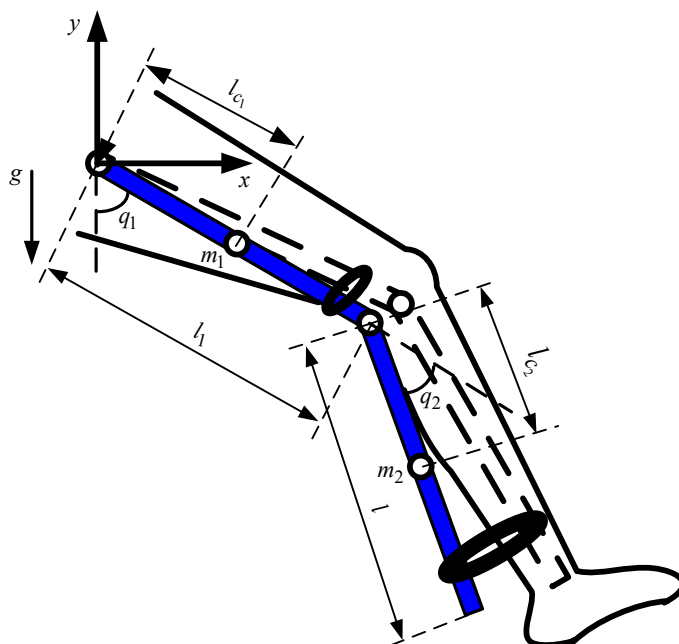


Рис. 1

между угловым положением экзоскелета и суставов человека. У модели экзоскелета нижней конечности массы m_1 и m_2 находятся в центрах первого и второго звеньев соответственно.

Таблица 1

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Брусовая масса 1 (бедро), кг	m_1	6.5
Брусовая масса 2 (икра), кг	m_2	3.02
Брусовая длина 1, м	l_1	0.52
Брусовая длина 2, м	l_2	0.39
Длина до центра бруса 1, м	l_{c1}	0.26
Длина до центра бруса 2, м	l_{c2}	0.185
Момент инерции бруса 1, кг · м ²	I_1	1.17
Момент инерции бруса 2, кг · м ²	I_2	0.28
Гравитационное ускорение, м/с ²	g	9.81

Динамические уравнения движения экзоскелета на основе уравнений Лагранжа II рода можно описать следующей формулой [3]–[7]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}_i} + \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} = \boldsymbol{\tau}_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где $\mathbf{q}_i$ – вектор обобщенных координат; $\mathcal{D}$ – механическая диссипативная функция; $\boldsymbol{\tau}_i$ – вектор обобщенной силы;

$\mathcal{L} = K - P$ – функция Лагранжа; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия;

Кинетическую энергию в обобщенных координатах запишем таким образом:

$$K = \sum_1^n K_i = \sum_1^n \left(\frac{m_i v_{c_i}^2}{2} + \frac{I_i (\dot{q}_i)^2}{2} \right),$$

где $v_{c_i}^2 = \dot{x}_{c_i}^2 + \dot{y}_{c_i}^2$; v_{c_i} – скорость центральной массы; x_{c_i}, y_{c_i} – фиксированная система координат в направлениях x и y при проецировании твердых объектов; I_i – момент инерции брусков.

Потенциальная энергия системы имеет вид

$$P = \sum_1^n P_i = \sum_1^n m_i g y_{c_i}.$$

Система дифференциальных уравнений движения экзоскелета может быть записана в виде матрицы следующим образом:

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

где $M(\mathbf{q}) = \{M_{ij}\}$ – функциональная матрица инерции объекта, симметричная и положительно определенная:

$$M(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} I_1 + m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos q_2 & -m_2 l_{c2}^2 - m_2 l_1 l_{c2} \cos q_2 \\ -m_2 l_{c2}^2 - m_2 l_1 l_{c2} \cos q_2 & I_2 + m_2 l_{c2}^2 \end{bmatrix};$$

$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \{C_{ij}\}$ – функциональная матрица кориолисовых и центробежных сил, зависящих от скоростей:

$$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -2m_2 l_1 l_{c_2} \dot{q}_2 \sin q_2 & m_2 l_1 l_{c_2} \dot{q}_2 \sin q_2 \\ m_2 l_1 l_{c_2} \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \{G_i\}$ – функциональный вектор гравитационных сил:

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_1 g l_{c_1} \sin q_1 + m_2 g l_1 \sin q_1 + m_2 g l_{c_2} \sin (q_1 - q_2) \\ m_2 g l_{c_2} \sin (q_1 - q_2) \end{bmatrix},$$

где $q_1, \dot{q}_1, \ddot{q}_1$ – угловое положение, угловая скорость, угловое ускорение тазобедренного сустава соответственно; $q_2, \dot{q}_2, \ddot{q}_2$ – угловое положение, угловая скорость, угловое ускорение коленного сустава соответственно; $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – матрица обобщенных сил; $F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – силы трения и неизвестные возмущения.

Управление электроприводами экзоскелета. Алгоритм управления с использованием метода децентрализованного управления подробно рассмотрен в [8], [9]. Он применяется для устранения нелинейности в динамической модели.

Пусть

$$\begin{cases} \alpha = M(\mathbf{q}); \\ \beta = C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}). \end{cases} \quad (2)$$

Выберем закон управления

$$\boldsymbol{\tau} = \alpha \boldsymbol{\tau}' + \beta, \quad (3)$$

а также закон управления двигателя

$$\boldsymbol{\tau}' = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ – вектор n -й компоненты момента, который приводит в движение суставы.

Из (2)–(4) выводим закон децентрализованного управления следующим образом:

$$\boldsymbol{\tau} = M(\mathbf{q}) [\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e}] + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \quad (5)$$

где $\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ – ошибка; $\mathbf{q}_d$ – заданная траектория; $\mathbf{q}$ – реальная траектория; $\mathbf{k}_p$, $\mathbf{k}_D$ – диагональные матрицы:

$$\mathbf{k}_p = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{pn} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_D = \begin{bmatrix} k_{D1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{D2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{Dn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_p, \mathbf{k}_D > 0.$$

Метод децентрализованного управления – один из первых основанных на модели подходов к управлению движением, т. е. тех, в которых однозначно используется знание матриц $M(\mathbf{q})$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ и вектора $\mathbf{G}(\mathbf{q})$. Кроме того, обратите внимание, что желаемая траектория движения $\mathbf{q}_d(t)$ и ее производные $\dot{\mathbf{q}}_d(t)$ и $\ddot{\mathbf{q}}_d(t)$, а также измерения положения и скорости $\mathbf{q}(t)$ и $\dot{\mathbf{q}}(t)$ используются для вычисления управляющего действия (5).

На основании (5) составим схему нелинейного управления по методу децентрализованного управления экзоскелетом (рис. 2).

Построим два контура управления, используя метод децентрализованного управления. Обратная связь внутреннего контура описывает динамику системы и компенсирует все ее нелинейности [10]. Внешняя обратная связь вычисляет разницу между выходным и установленным сигналами и служит для стабилизации системы.

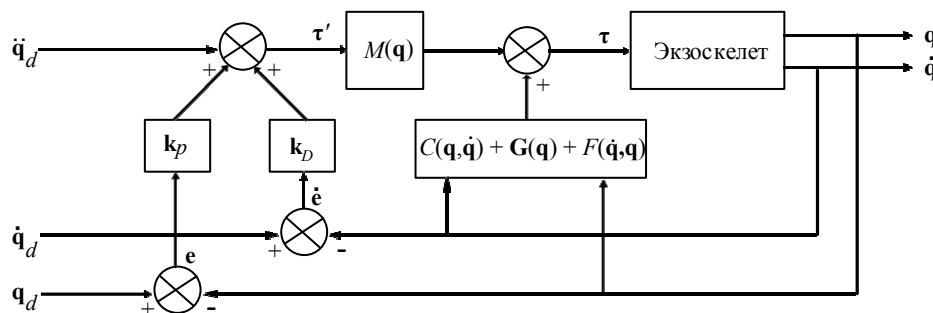


Рис. 2

Применив балансирование (1) и (5), получаем:

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = M(\mathbf{q}) \times \\ \times [\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e}] + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}); \\ M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = M(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e}]. \quad (6)$$

Так как $M(\mathbf{q})$ – положительная матрица, то из (6) получим следующее характеристическое уравнение:

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7), в свою очередь, может быть выражено через вектор состояния $[\mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}}^T]^T$ следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}} \\ -\mathbf{k}_p \mathbf{e} - \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{k}_p & -\mathbf{k}_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица измерения.

Важно отметить, что уравнение (8) с обратной связью представлено линейным автономным дифференциальным уравнением, единственная точка равновесия которого $[\mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}}^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{2n}$. Единственность равновесия следует из того факта, что матрица $\mathbf{k}_p$ спроектирована так, чтобы быть положительно определенной и, следовательно, не особой.

Поскольку уравнение с замкнутым контуром (8) – линейное и автономное, то его решение может быть использовано для анализа устойчивости начала координат с применением прямого метода Ляпунова [11].

Для этого введем постоянную ε , удовлетворяющую условию

$$\lambda_{\min} \{\mathbf{k}_D\} > \varepsilon > 0,$$

где ε – положительная постоянная константа; $\lambda_{\min}$ – минимальное конкретное значение.

Умножив на $\mathbf{x}^T \mathbf{x}$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ любой ненулевой вектор, получим $\lambda_{\min} \{\mathbf{k}_D\} \mathbf{x}^T \mathbf{x} > \varepsilon \mathbf{x}^T \mathbf{x}$. Так как $\mathbf{k}_D$ является заданной симметричной матрицей $\mathbf{x}^T \mathbf{k}_D \mathbf{x} \geq \lambda_{\min} \{\mathbf{k}_D\} \mathbf{x}^T \mathbf{x}$, то

$$\mathbf{x}^T [\mathbf{k}_D - \varepsilon \mathbf{I}] \mathbf{x} > 0, \quad \mathbf{x} \neq 0 \in \mathbb{R}^n.$$

Это означает, что матрица $\mathbf{k}_D - \varepsilon \mathbf{I}$ положительно определена, т. е.

$$\mathbf{k}_D - \varepsilon \mathbf{I} > 0. \quad (9)$$

Учитывая вышесказанное, положительность матрицы $\mathbf{k}_p$ и положительность константы ε , получим

$$\mathbf{k}_p + \varepsilon \mathbf{k}_D - \varepsilon^2 \mathbf{I} > 0. \quad (10)$$

Рассмотрим функцию Ляпунова:

$$V(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{k}_p + \varepsilon \mathbf{k}_D & \varepsilon \mathbf{I} \\ \varepsilon \mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \\ = \frac{1}{2} [\dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \mathbf{e}]^T [\dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \mathbf{e}] + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T [\mathbf{k}_p + \varepsilon \mathbf{k}_D - \varepsilon^2 \mathbf{I}] \mathbf{e}, \quad (11)$$

где постоянная ε удовлетворяет (9) и (10). Отсюда следует, что функция (11) – положительно определенная. Для более наглядного представления перепишем функцию Ляпунова (11) в виде

$$V(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^T \dot{\mathbf{e}} + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T [\mathbf{k}_p + \varepsilon \mathbf{k}_D] \mathbf{e} + \varepsilon \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}}. \quad (12)$$

Вычислив производную функции $V(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}})$ (12) по времени, получим:

$$\dot{V}(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = \dot{\mathbf{e}}^T \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{e}^T [\mathbf{k}_p + \varepsilon \mathbf{k}_D] \dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \dot{\mathbf{e}}^T \dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \mathbf{e}^T \ddot{\mathbf{e}}. \quad (13)$$

Подставляя (8) в (13) и выполнив некоторые изменения, получим:

$$\dot{V}(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = \dot{\mathbf{e}}^T [\mathbf{k}_D - \varepsilon \mathbf{I}] \dot{\mathbf{e}} - \varepsilon \mathbf{e}^T \mathbf{k}_p \mathbf{e} = \\ = - \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \varepsilon \mathbf{k}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{k}_D - \varepsilon \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Поскольку ε выбрано так, что $\mathbf{k}_D - \varepsilon \mathbf{I} > 0$ и $\mathbf{k}_p$ – положительно определенная матрица, то функция $\dot{V}(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}})$ в (14) отрицательно определена.

Таким образом, источник $[\mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}}^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{2n}$ уравнения с замкнутым контуром равномерно асимптотически устойчив, и поэтому

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{e}}(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0,$$

из чего следует, что цель управления движением достигнута, так как уравнение (8) – линейное и автономное, что соответствует глобальной экспоненциальной устойчивости.

Для практических целей расчетные матрицы $\mathbf{k}_p$ и $\mathbf{k}_D$ могут быть выбраны диагональными. Это означает, что уравнение с замкнутым контуром (8) представляет собой несвязанную многопараметрическую линейную систему, т. е. динамическое поведение ошибок каждой совместной позиции определяется линейными дифференциаль-

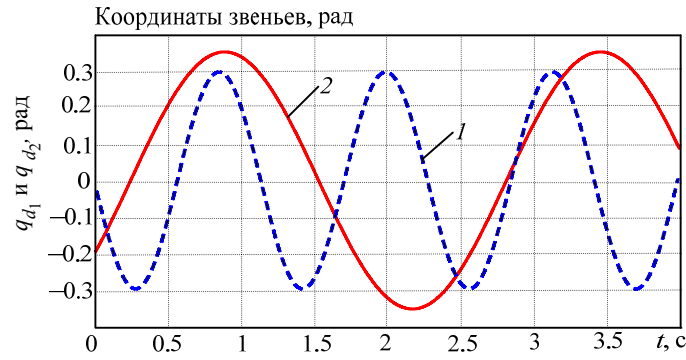


Рис. 3

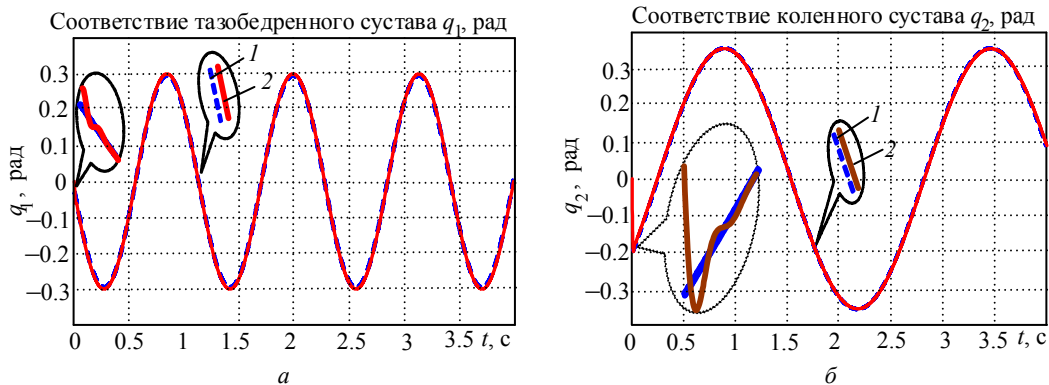


Рис. 4

ными уравнениями второго порядка, которые не зависят друг от друга.

Результаты моделирования. Моделирование системы управления по методу децентрализованного управления экзоскелета выполнено с параметрами, приведенными в [12].

Режим движения модуля выбран близким к движению ноги экзоскелета при ходьбе [9], [13]–[15]. Заданные траектории показаны на рис. 3:

$$\begin{aligned} q_{d1} &= -0.031 \cos(5.476t) - 0.3 \sin(5.476t), \\ q_{d2} &= 0.302 \sin(2.44t) - 0.201 \cos(2.44t), \end{aligned}$$

где t – время, с.

На рис. 3 кривая 1 – q_{d1} , кривая 2 – q_{d2} .

Компоненты возмущения, действующие на суставы экзоскелета, приведены в следующем виде [12]:

$$F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0.5\dot{q}_1 + \sin(3q_1) \\ 1.3\dot{q}_2 - 1.8\sin(2q_2) \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты $\mathbf{k}_p$, $\mathbf{k}_D$ структуры управления ПД (П – пропорциональный, Д – дифференциальный) – диагональные матрицы, выбранные следующим образом:

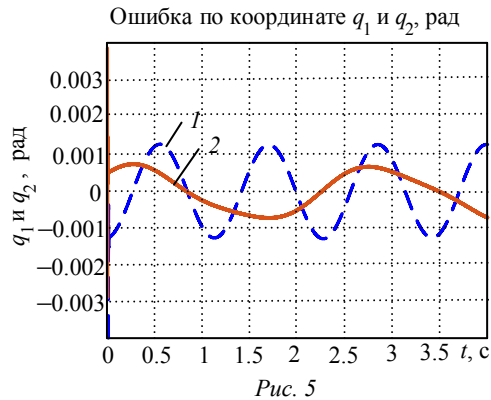
$$\mathbf{k}_p = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_D = \begin{bmatrix} 80 & 0 \\ 0 & 80 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования приведены на рис. 4–6.

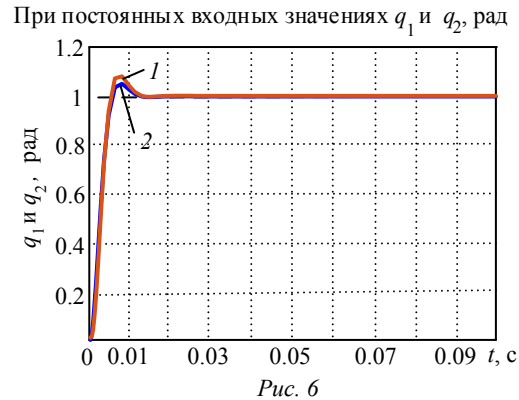
Как видно из рис. 4 и 5 (кривая 1 – заданная траектория тазобедренного (рис. 4, а) и коленного (рис. 4, б) суставов, кривая 2 – реальная траектория тазобедренного (рис. 4, а) и коленного (рис. 4, б) суставов), регулятор позволяет хорошо повторять заданную траекторию с небольшими ошибками $1.2 \cdot 10^{-3}$ рад (кривая 1 на рис. 5) для тазобедренного сустава (q_1) и $0.9 \cdot 10^{-3}$ рад (кривая 2 на рис. 5) для коленного сустава (q_2).

Используя регулятор с постоянным входным значением, получим результаты выхода, показанные на рис. 6 (кривая 1 – тазобедренный сустав, кривая 2 – коленный сустав). Регулятор построен для управления экзоскелетом, который хорошо функционирует с заданными значениями: максимальное отклонение амплитуды в чрезмерном времени – 0.08 рад; чрезмерное время – 0.012 с.

Применение других методов для построения динамической модели многосвязной системы электромеханической передачи, если она применяется к экзоскелетам, может привести к потере качественной информации при моделировании движения экзоскелета (можно не увидеть



эффект дрожания звеньев) [7]. Использование компьютерных технологий для построения динамических моделей мехатронных объектов открывает новые качественные возможности для экзоскелета в синтезе управления электроприводами. Регулятор выполняется на основе разделения динамической модели экзоскелета на линейную и нелинейную



части, поэтому такие компоненты, как сила тяжести, сила трения, радиальный крутящий момент, будут компенсированы. Затем регулятор ПД используется для управления желаемой траекторией. Метод децентрализованного управления позволяет снизить потребление энергии, что актуально для экзоскелета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 376 с.
2. Юревич Е. И. Основы робототехники. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 416 с.
3. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of electric machinery and drive system // IEEE Press, Danvers, 2002. P. 613.
4. Mansour Torabi, Mojtaba Sharifi B., Gholamreza Vossoughia. Robust Adaptive sliding mode admittance control of exoskeleton rehabilitation robots // Scientia Iranica. 2018. № 25(5). P. 2628–2642.
5. Львович А. Ю. Электромеханические системы: учеб. пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 296 с.
6. Мартыненко Ю. Г. Аналитическая динамика электромеханических систем. М.: Изд-во МЭИ, 1984. 64 с.
7. Гаврилов С. В., Коноплев В. А. Компьютерные технологии исследования многозвенных мехатронных систем. СПб.: Наука, 2004. 191 с.
8. Spong M. W. On the robust control of robot manipulators // IEEE Transactions on automatic control. 1992. Vol. 37, № 11. P. 1782–1786.
9. Гаврилов С. В., Занг Д. Т., Чан Д. Х. Особенности динамики экзоскелетов с вентильными двигателями

10. Design baseline computed torque controller / F. Piltan, M. Mirzaei, F. Shahriari, I. Nazari, S. Emamzadeh // Intern. J. of Engineering (IJE). 2012. Vol. 6. P. 129–141.
11. Rafael K., Davila V. S., Perez J. L. Control of robot manipulators in joint space. USA: Springer Science & Business Media, 2006. P. 439.
12. Saim A., Wang H., Tian Y. Model-free control using time delay estimation and fractional-order nonsingular fast terminal sliding mode for uncertain lower-limb exoskeleton // J. of Vibration and Control. 2018. Vol. 24, № 22. P. 5273–5290.
13. Yunpeng W., Long C. Polynomial trajectory tracking of networked Euler–Lagrange systems // IEEE Proc. of the 33rd Control Conf. Nanjing, China, 2014. P. 1568–1573.
14. Gautam R., Patil T. Modeling and control of joint angles of a biped robot leg using PID controllers // IEEE Intern. conf. on engineering and technology (ICETECH). Combatore, India, 2015. P. 978–983.
15. Mandava R. K., Vundavalli P. R. Design of PID controllers for 4-DOF planar and spatial manipulators // 2015 Intern. Conf. on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE). IEEE, 2015. P. 1–6.

M. P. Belov, D. D. Truong, N. V. Lanh
Saint Petersburg Electrotechnical University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND CONTROL BY THE METHOD OF SEPARATION OF THE CONTROL LAW FOR THE EXOSKELETON

Explores the possibility of using a nonlinear controller based on the separated control of an exoskeleton electric drive, which allows to exclude all nonlinear components and cross-connections. One of the significant difficult problems in control algorithms is the design of linear controllers for nonlinear systems. The exoskeleton is a powerful nonlinear control object with many uncertain parameters, so the application of traditional control methods is extremely difficult. To reduce these difficult problems, a nonlinear controller is built on the basis of the method of separated control. However, the application of this method requires the construction of an accurate kinematic model of the object to provide the necessary torque. The process of constructing a model of motion dynamics is considered using the example of a two-joint module of the lower extremity exoskeleton with disturbances. An exoskeleton regulator has been built with high accuracy and energy saving, in accordance with management requirements. The exoskeleton regulator was simulated in Matlab & Simulink.

Exoskeleton, motion dynamics, mathematical model, electric drive, mechatronic system, structural exoskeleton, exoskeleton control, separation of the control law

УДК 681.3:62-52

Н. И. Татаринцев, Д. С. Карасев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Применение энергосберегающего режима в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе

Рассматриваются пути снижения энергопотребления электроприводов промышленных агрегатов, в частности асинхронных частотно-регулируемых электроприводов. Проведена оценка экономического потенциала энергосбережения в рассматриваемых приводах. Показана необходимость снижения энергопотребления в рассматриваемых агрегатах. Подробно излагается возможный метод реализации энергосберегающего режима работы при скалярном управлении с пропорциональным законом регулирования. Производится анализ применения принципов скалярного управления, а также представленного метода снижения энергопотребления в промышленных преобразователях частоты. Представлена временная диаграмма работы электропривода при переходе в энергосберегающий режим и выходе из него, демонстрирующая влияние параметров энергосбережения на работу привода в представленном экономном режиме. Выявлен недостаток рассмотренного энергосберегающего режима и возможные последствия его использования.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод, энергосберегающий электропривод, скалярное управление, функция энергосбережения в преобразователе частоты

На сегодняшний день в развитых странах основными потребителями всей вырабатываемой электроэнергии являются электроприводы. При огромном расходе электричества, темпы которого постоянно возрастают ввиду роста производственной и иной деятельности человека, становится актуальной задача минимизации их энергопотребления. Энергосбережение представляет собой в первую очередь снижение бесполезных потерь энергии. Применение энергосберегающих

методов в рабочих циклах приводов не только способствует эффективному использованию энергетических ресурсов страны и их значительной экономии, но и является одним из возможных направлений решения экологических проблем, связанных с производством электроэнергии.

Объектом рассмотрения служит достаточно распространенный частотно-регулируемый асинхронный электропривод с U/f -управлением.

Применяемые промышленные агрегаты. Прежде чем перейти к рассмотрению предложенного метода энергосбережения, важно оценить его экономический потенциал в используемых электроприводах.

Исключая маломощные (в бытовых приборах), электроприводы могут использоваться:

1. В агрегатах, обслуживающих технологические процессы, которые не осуществимы без точного управления технологическими координатами, – металлообрабатывающих станках, прокатных станах, бумагоделательных машинах, роботах и др.

2. В простых агрегатах – транспортерах, конвейерах, вентиляторах, насосах и пр.

Первую группу составляют не более 10 % электроприводов [1], при этом в данной группе, как правило, уже осуществлены современные технически эффективные решения. Во вторую группу входят около 90 % электроприводов [1], и в ней содержится огромный резерв энергосбережения, поскольку в таких агрегатах обычно стоят простые, зачастую нерегулируемые электроприводы. При этом технологические процессы, обслуживаемые этими приводами, нуждаются в управлении технологическими координатами, например скоростью, расходом, давлением, температурой и др. Управление этими координатами зачастую происходит энергетически неэффективно, что приводит к большим потерям. Стоит, однако, отметить, что в настоящее время в связи с активным внедрением доступного регулируемого электропривода для крупных городов России – например Санкт-Петербурга или Москвы, данная информация скорее неактуальна, но в большинстве своем в малых городах проблема до сих пор остается нерешенной.

Выбор пути снижения потребления. Среди принципов экономии энергии в электроприводе можно выделить два типа мероприятий по минимизации энергопотребления электроприводной системы:

1) оптимизация аппаратной части электропривода – при этом привод все так же остается нерегулируемым;

2) замена нерегулируемого электропривода регулируемым.

Экономический потенциал энергосбережения в конструкции электродвигателей практически исчерпан, они считаются достаточно совершен-

ными. Остается только оптимизация всей электромеханической системы агрегата при помощи правильного подбора основного оборудования, в частности двигателя и редуктора, если он используется, уменьшения потерь в питающих сетях и т. п. Такой подход к оптимизации энергоэффективности электропривода в настоящее время неактуален, поскольку достигаемый эффект от перечисленных мероприятий может оказаться гораздо меньше убытков от использования нерегулируемых электроприводов.

Таким образом, случай перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому является основной возможностью снижения энергопотребления электропривода, при этом повышается эффективность управления другими показателями технологического процесса.

Энергосберегающий режим при скалярном управлении. Рассматриваемый частотно-регулируемый асинхронный электропривод представляет собой систему «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором». В данном приводе распространены две стратегии управления в разнообразных исполнениях:

- 1) векторное управление;
- 2) скалярное управление (U/f -управление).

Векторное управление имеет огромную популярность, однако чаще всего оно предназначено для приводов, отвечающих высоким требованиям к качеству регулирования, а значит, энергоэффективность таких приводов ставится на второй план, хотя и предпринимаются попытки ее повышения. При этом, как было сказано ранее, количество таких приводов относительно мало.

Скалярное управление распространено для регулирования электроприводов в ранее перечисленных простых агрегатах, где не требуется высокая динамика, точность, а также большой диапазон регулирования. Такие электроприводы не всегда способны отработать быстрые изменения статического момента.

Для каждого агрегата с регулируемым электроприводом, выполняющего определенный технологический процесс, существенен выбор рационального с технической точки зрения закона управления величиной (величинами), определяющей потребляемую агрегатом мощность.

В зависимости от характера нагрузки различают следующие законы регулирования при U/f -управлении:

1) $U/f = \text{const}$ – при постоянном моменте сопротивления $M_c = \text{const}$;

2) $U/f^2 = \text{const}$ – при работе двигателя на вентиляторную нагрузку;

3) $U/\sqrt{f} = \text{const}$ – при постоянной мощности двигателя $P = \text{const}$.

На практике чаще всего применяется закон $U/f = \text{const}$, причем зачастую встречаются случаи использования данного закона в агрегатах с вентиляторной нагрузкой, поэтому ограничимся рассмотрением энергосберегающего режима при регулировании именно по этому закону.

Известно, что при $U/f = \text{const}$ с учетом IR -компенсации теоретическая механическая характеристика асинхронного двигателя приобретает вид, представленный на рис. 1, на котором изображена естественная характеристика при номинальной частоте питания $f_{1н}$ и искусственные характеристики при частотах питания f_{11} и f_{12} .

При номинальной частоте $f_{1н}$ и в отсутствии нагрузки двигатель вращается с частотой холостого хода $\omega_{0н}$, однако, набрасывая момент сопротивления M_c , частота вращения двигателя немного снижается до значения ω_n . Наброс момента возможен в рабочей зоне до критического момента M_k . Дальнейшая перегрузка двигателя может привести к аварии. Аналогичная ситуация и с искусственными характеристиками, которые смещаются параллельно естественной, хотя на малых частотах это условие не выполняется.

Как видно из характеристики, момент сопротивления M_c двигателя значительно меньше критического M_k . Отсюда следует вывод, что к дви-

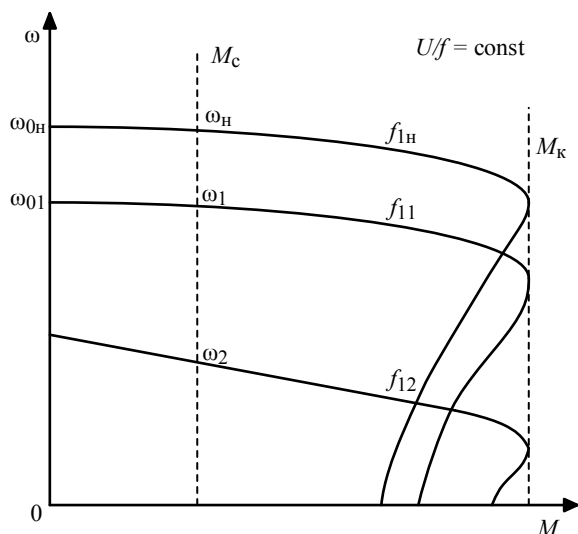


Рис. 1

гателью прикладывается большее напряжение, а значит, и мощность, чем требуется для поддержания момента на валу. Таким образом, введя некоторый коэффициент энергосбережения k , регулируемый в пределах от 0 до 1, можно преобразовать закон $U/f = \text{const}$ к следующему виду:

$$k \frac{U}{f} = \text{const}.$$

Изменяя k , можно уменьшать напряжение статора, сдвигая критический момент M_k ближе к статическому моменту M_c до значения M'_k (рис. 2), тем самым уменьшая потребляемую мощность, что приводит к снижению энергопотребления привода.

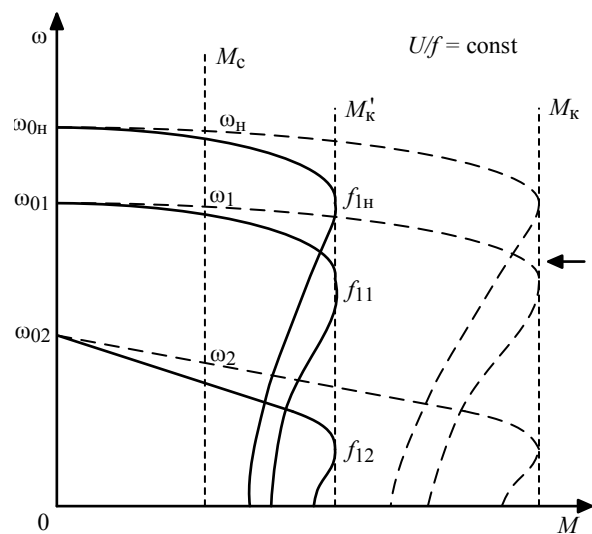


Рис. 2

Тот же метод работает и при других законах скалярного управления. Именно на данном принципе базируется энергосберегающий режим, применяемый в асинхронных электроприводах с U/f -управлением.

Потенциал для применения представленного энергосберегающего режима весьма велик. Подъемно-транспортные механизмы часть своего рабочего цикла работают нагруженными, другую же часть они перемещаются вхолостую, при этом количество таких циклов за день может быть значительно. Насосные агрегаты в системах водоснабжения днем имеют большую загруженность, чем ночью. Примеров, когда промышленные агрегаты имеют различную загруженность в течение своего рабочего цикла, можно привести очень много.

Применение энергосберегающего режима в преобразователе частоты. В существующих преобразователях частоты (ПЧ), например в [2],

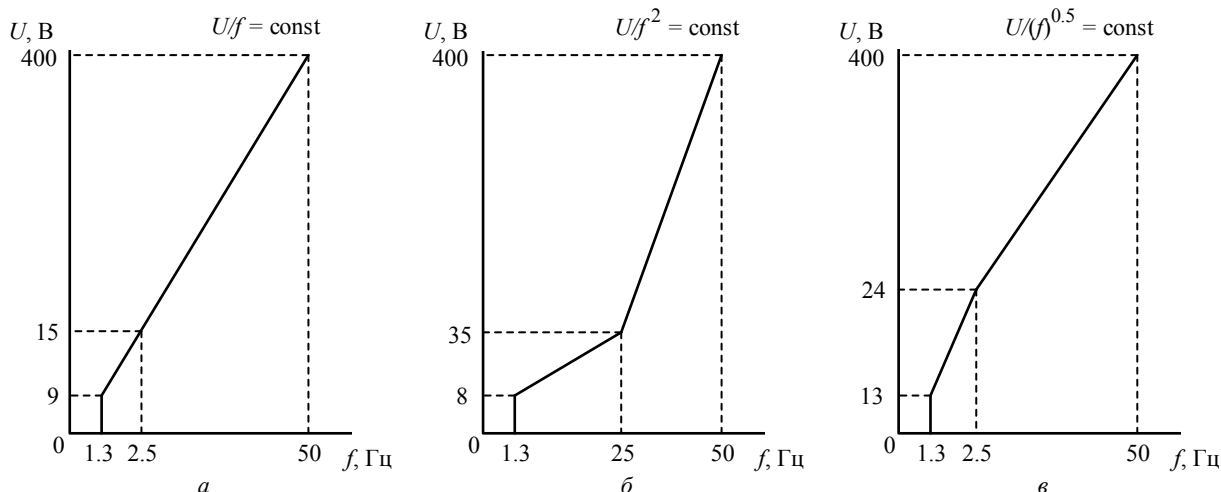


Рис. 3

скалярное управление обычно реализуется путем настройки заложенных в ПЧ шаблонов кривых пропорциональности напряжения и частоты (рис. 3). При настройке ПЧ на скалярное управление можно выбирать предварительно установленные характеристики, реализующие пропорциональное регулирование (рис. 3, а), регулирование при вентиляторной нагрузке (рис. 3, б) или регулирование с постоянством мощности (рис. 3, в), либо создать свою – пользовательскую характеристику, изменяя наклон различных участков характеристики для реализации своего уникального закона регулирования, подходящего для конкретного исполнительного механизма. Именно таким образом на практике реализуются законы регулирования в преобразователях частоты.

Современные преобразователи частоты универсальны и многофункциональны. Очень часто они имеют в своем функционале режим энергосбережения, реализованный различными методами. Некоторые преобразователи частоты, в том числе и [2], имеют реализацию представленного в статье метода энергосбережения при скалярном управлении, выполненную следующим образом. При незначительной нагрузке привода во время своего рабочего процесса на заранее запрограммированный многофункциональный вход ПЧ подается команда активации энергосберегающего режима. В соответствии с заданными параметрами энергосбережения выходное напряжение ПЧ снижается, что приводит к экономии энергии в ущерб максимально поддерживаемой нагрузке. Затем при нормальной нагрузке привода энергосберегающий режим отключается и ПЧ работает в нормальном режиме.

В качестве параметров энергосбережения выступают:

- 1) коэффициент энергосбережения, %;
- 2) время восстановления напряжения, с;
- 3) частота активации энергосбережения, Гц.

Коэффициент энергосбережения определяет выходное напряжение ПЧ и задается в процентах от формируемого напряжения запрограммированной кривой пропорциональности напряжения и частоты ПЧ, представленной на рис. 3.

Время восстановления напряжения задается в секундах и определяет скорость изменения выходного напряжения ПЧ при включении и отключении энергосберегающего режима.

Частота активации энергосбережения определяет нижний предел частоты, при которой возможна работа энергосберегающего режима. Команда энергосбережения активируется только тогда, когда задание частоты превышает этот нижний предел. Параметр можно оставить в нулевом значении, тогда энергосберегающий режим можно будет активировать сразу после подачи команды пуска привода.

Во время работы привода коэффициент энергосбережения и частота активации энергосбережения могут изменяться – таким образом энергосберегающий режим можно адаптировать к изменяющимся во время работы привода условиям нагрузки исполнительного механизма, обеспечивая максимальную эффективность энергосбережения.

На рис. 4 представлена временная диаграмма демонстрации работы привода при переходе в энергосберегающий режим и выходе из него.

В начале рабочего цикла на привод подается команда пуска, после чего он начинает выходить на заданную скорость вращения, соответствующую

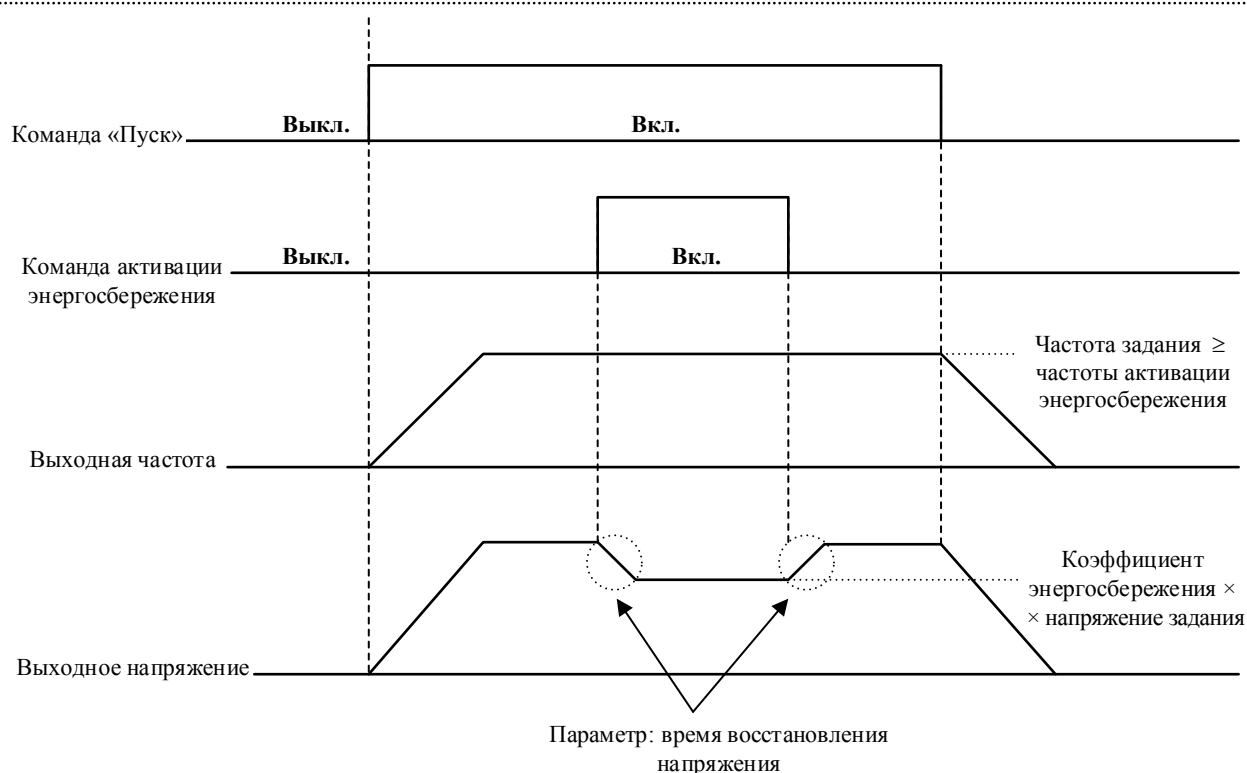


Рис. 4

щую выходной частоте ПЧ, которая должна быть больше установленной частоты активации энергосбережения. Через какой-то промежуток времени, когда на приводе будет присутствовать незначительная нагрузка вследствие его разгрузки, подается команда активации режима энергосбережения, после которой ПЧ изменяет свое выходное напряжение в соответствии с заданным коэффициентом энергосбережения за время восстановления напряжения. Далее через промежуток времени, по прошествии которого предполагается, что привод снова должен будет снова нагрузиться, команда активации режима энергосбережения снимается, и ПЧ изменяет свое выходное напряжение в соответствии с заданием нормальной работы, т. е. выбранным шаблоном кривой пропорциональности напряжения и частоты также за время восстановления напряжения. В конце рабочего цикла прекращается подача команды пуска, и привод останавливается.

Заключительная оценка метода. Представленный метод снижения энергопотребления асинхронным электроприводом со скалярным управлением очень прост, а главное, эффективен

за счет огромной доли используемых агрегатов с этим приводом. Стоит отметить, однако, что недостатком данного метода энергосбережения является то, что оператор несет полную ответственность за установку коэффициента энергосберегающего режима. Моменты активации энергосберегающего режима программируются заранее в соответствии с заданным рабочим циклом электропривода исполнительного механизма агрегата. При отклонении от этого рабочего цикла вследствие случайных внешних возмущений существует опасность превышения момента сопротивления над установленным, фиксированным критическим моментом, что может привести к неожиданному опрокидыванию асинхронного двигателя и, как следствие, к аварии.

Материалы данной статьи в первую очередь предназначены для предприятий и научно-исследовательских организаций, занимающихся оптимизацией энергопотребления приводов переменного тока. Они могут быть полезны также специалистам, эксплуатирующим асинхронные электроприводы со скалярным управлением на простых промышленных агрегатах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.

2. SYSDRIVE 3G3FV. High-function General-purpose Inverter. User's Manual. Cat. № I516-E1-05. Omron. URL: <http://omrondoc.ru/C/I516-E1-05.pdf>.

N. I. Tatarintsev, D. S. Karasyov
Saint Petersburg Electrotechnical University

ENERGY-SAVING MODE APPLICATION IN THE VARIABLE-FREQUENCY INDUCTION ELECTRIC DRIVE

Considers ways to reduce the industrial units' electric drives energy consumption, in particular, variable-frequency induction drives. The economic potential assessment of energy conservation in the drives under consideration. The need for reducing energy consumption in the units under consideration is shown. The possible implementing method an energy-saving mode operation under scalar control with a proportional control law is described in detail. An application analysis of the scalar control principles is made, as well as the presented reducing energy consumption method in industrial frequency invertors. An electric drive operation temporary diagram during the entering to the energy-saving mode and exiting from it is presented, demonstrating the energy-saving parameters influence to the drive operation in the presented energy-saving mode. Also, it considers energy-saving mode drawback and the possible consequences of its use are revealed.

Variable-frequency AC electric drive, energy-saving electric drive, V/f control, energy-saving mode in the frequency inverter

УДК 620.92

Н. Нтавухоракомейе
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Л. Ндайрагиже
Государственный университет Бурунди

Проектирование и разработка экономически эффективного контроллера заряда автономной солнечной электростанции

Спроектирован и разработан экономичный и эффективный контроллер солнечной электростанции с автоматическим выключателем и индикатором при учете климатических условий Республики Бурунди. Этот контроллер заряда работает с топологией DC-DC-преобразователя для зарядки аккумулятора. Система реализована с использованием недорогих и распространенных аппаратных компонентов. Разработанный контроллер заряда в сочетании с регулируемым напряжением и током подходит для автоматического включения-выключения электростанции. Для увеличения срока службы аккумуляторной батареи циклы ее перезарядки оптимизируются. В системе использована регулируемая интегральная микросхема (IC – integrated circuit), для управления напряжением преобразователя постоянного тока. Описана архитектура системы для регулируемого источника питания с выходом 14 В, 3 А. В представленной системе применяется резистивное управление для ограничения выходного сигнала ППТ, а также для ограничения напряжения или тока.

Результаты испытаний подтверждают, что применение предложенного метода приводит к лучшему использованию доступной солнечной энергии.

Контроллер заряда, аккумуляторная батарея, преобразователь постоянного тока, микроконтроллер, резистивное управление

В настоящее время растет спрос на использование солнечной энергии в связи с повышенной потребностью в электричестве и истощением невоз-

обновляемых источников энергии. Поскольку солнечная энергия не постоянна, а зависит от погодных условий – солнечного излучения и температуры

окружающей среды, аккумуляторная батарея (АКБ) всегда подключена между солнечной панелью и нагрузкой через контроллер заряда для защиты аккумулятора от перегрузки и глубокого разряда.

В автономных фотоэлектрических системах АКБ широко используются для питания нагрузок при отсутствии солнечного излучения. Эти АКБ чувствительны к явлениям перегрузки, глубокого разряда, а также температурных и токовых дрейфов, поэтому они должны быть связаны с контроллером, чтобы обеспечить их защиту, т. е. чтобы поддерживать АКБ на максимально возможном уровне заряда. Тем не менее, это должно быть сделано с большой осторожностью, чтобы соответствовать требованиям стоимости, простоты и надежности [1]. По мере развития технологии управление зарядом может выполняться в ряде схем различных типов.

АКБ с чрезмерным зарядом имеют гораздо более короткий срок службы, так как электролит испаряется в виде газа и теряется. Контроллер заряда используется для отключения любой нагрузки, когда АКБ разряжается до безопасного напряжения отключения, поскольку чрезмерно разряженные свинцово-кислотные АКБ необратимо повреждаются [2].

Основными целями создания контроллера являются компактность и в основном аппаратная конструкция, эффективная работа для обеспечения регулируемого выходного напряжения и возможность автоматического отключения в случае полной зарядки батареи.

Модель и система солнечного элемента. Фотоэлектрические панели преобразуют солнечный свет в электрическую энергию, что является одним из лучших подходов для получения электроэнергии в течение длительного времени. Преобразование солнечного света в электроэнергию в значительной степени зависит от уровня инсоляции и эффективности элемента.

Солнечные фотоэлектрические системы используются сегодня для освещения, зарядки ак-

кумулятора, откачки воды, спутниковых систем питания и т. п.

Модель фотоэлектрического генератора используется для расчета выходной мощности фотоэлектрических панелей при любых условиях температуры и освещенности. Идеальный фотоэлемент может быть представлен источником тока с параллельно подключенным диодом. В этом случае последовательные и шунтирующие сопротивления считаются равными нулю и бесконечности соответственно. Тем не менее, в реальной системе как последовательные, так и шунтирующие сопротивления имеют определенные значения и должны учитываться. На рис. 1 представлены эквивалентные схемы солнечного элемента: *a* – идеальная, *b* – реальная [3].

На рис. 1, *b* генерируемый ток I фотоэлементом определяется как

$$I = I_{к.з} - I_d - I_{sh}; \quad (1)$$

$$I = I_{к.з} - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{nU_T}} - 1 \right) - \left(\frac{U + IR_s}{R_{sh}} \right), \quad (2)$$

где U_T – тепловое напряжение; R_s и R_{sh} – внутренние последовательное и параллельное сопротивления соответственно; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания; I_0 – ток обратного насыщения; U – выходное напряжение; I – выходной ток; n – коэффициент идеальности диода (1~2); I_d – ток диода, I_{sh} – шунтирующий ток.

Так как параллельное сопротивление одного фотоэлектрического модуля намного менее значимо по сравнению с последовательным, пренебрегнув им, получим уравнение выходного тока в следующем виде:

$$I = I_{к.з} - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{nU_T}} - 1 \right). \quad (3)$$

Выходное напряжение фотоэлемента может быть найдено с учетом того, что тепловое напряжение зависит от абсолютной температуры T

$$U_T = \frac{KT}{q} \text{ в (3), как}$$

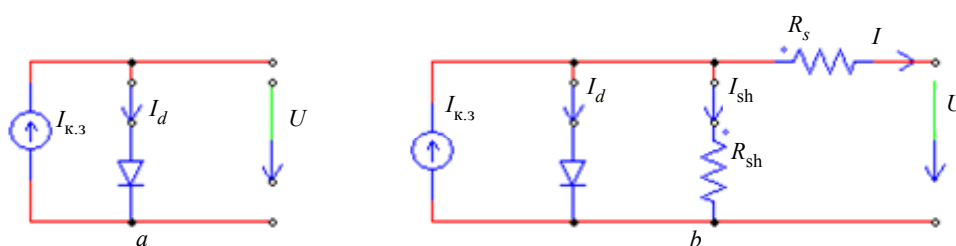


Рис. 1

$$U = -IR_s + \frac{AkT}{q} \ln \frac{(I_{к.з} + I_0 - I)}{I_0}, \quad (4)$$

где q – заряд электрона ($1.6021 \cdot 10^{-19}$ Кл); k – константа Больцмана ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹); T – температура, К.

Преобразователь напряжения. Преобразователь регулирует солнечное (фотоэлектрическое) напряжение: мгновенное изменение солнечного излучения приводит к изменению фотоэлектрического тока, фотоэлектрическое напряжение остается неизменным. Рис. 2 показывает характеристики преобразователя и солнечного элемента [4]. Существует только одна точка пересечения этих величин – точка В на рисунке. При написании дифференциального уравнения для индуктора можно сделать вывод, что эта рабочая точка стабильна. Таким образом, контроллер выходного напряжения может сделать систему стабильной, контроллер заряда напряжения обеспечивает стабильную работу в любых условиях [5].

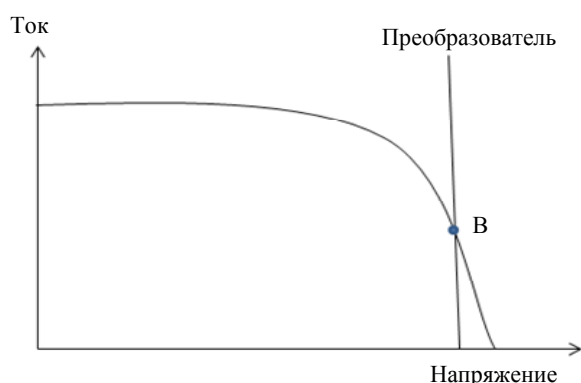


Рис. 2

Проектирование предлагаемого преобразователя напряжения. Управление зарядкой от солнечной энергии объединяет несколько функций в единую конструкцию: при низком падении напряжения LDO¹-регуляторы должны обеспечивать стабилизацию напряжения при минимально возможной разнице между входным и выходным напряжениями [6], номинальный ток 3 А, диапазон регулировки напряжения (свинцово-кислотные батареи 12 В) и защиту от обратной полярности. Высокая эффективность объясняется применением обычного операционного усилителя (орамп) LM358 и стабилитрона в качестве шунтирующего регулятора напряжения.

¹ LDO – low dropout voltage.

Среди преимуществ LDO-регуляторов напряжения по сравнению с другими регуляторами постоянного тока – отсутствие шума переключения (поскольку переключения не происходит), меньший размер устройства и большая простота конструкции [6].

Другие характеристики разработанного контроллера заряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Солнечный зарядный ток	от 0 до 3 А
Номинальное напряжение аккумулятора	12 В
Номинальное напряжение солнечной панели	от 14 до 20 В (50 Вт)
Тип батареи	Свинцово-кислотный (проверено при 12 В, 15 А · ч)
Защита от перезаряда и разряда путем сравнения тока в форме напряжения	√
Выравнивание заряда	√
Регулируемое выходное напряжение	√
3 светодиодных индикатора для отображения состояния контроллера заряда: – красный светодиод включен; – зеленый светодиод включен; – зеленый светодиод выключен	Показывает вывод с панели Зарядка аккумулятора Показывает вывод с панели

Упрощенная аппаратная блок-схема солнечной зарядной системы, спроектированной с учетом низкой стоимости и низкого энергопотребления при сохранении методологии управления зарядки, показана на рис. 3.

Алгоритм управления зарядом. Сначала выясняется, превышает ли напряжение 14.1 В. Если да, то нагрузка включена, а солнечная батарея выключена. Таким образом, напряжение будет уменьшаться. Если напряжение АКБ опускается ниже 13.5 В, начинается нормальная зарядка. Если напряжение все еще выше 13.5 В, солнечная панель отключается для предотвращения гистерезиса. Если же напряжение АКБ меньше 10.3 В, тогда нагрузка отключается и подключается солнечная панель. Нагрузка будет отключена до 11.3 В – точки низкого напряжения повторного подключения. При напряжении выше 11.3 В нагрузка и солнечная батарея подключены нормально. На рис. 4 показана блок-схема цепи контроллера заряда.

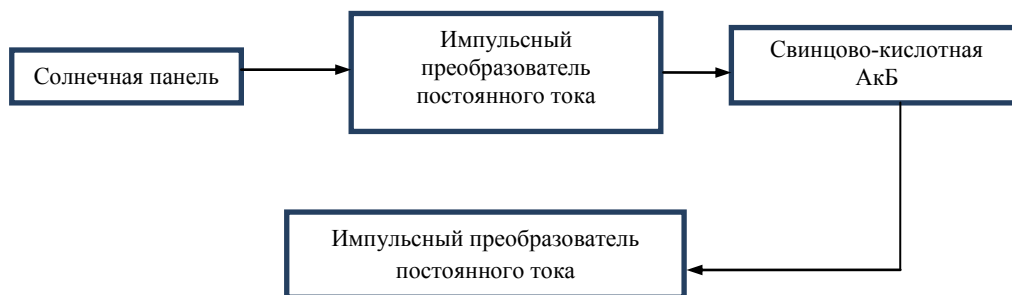


Рис. 3

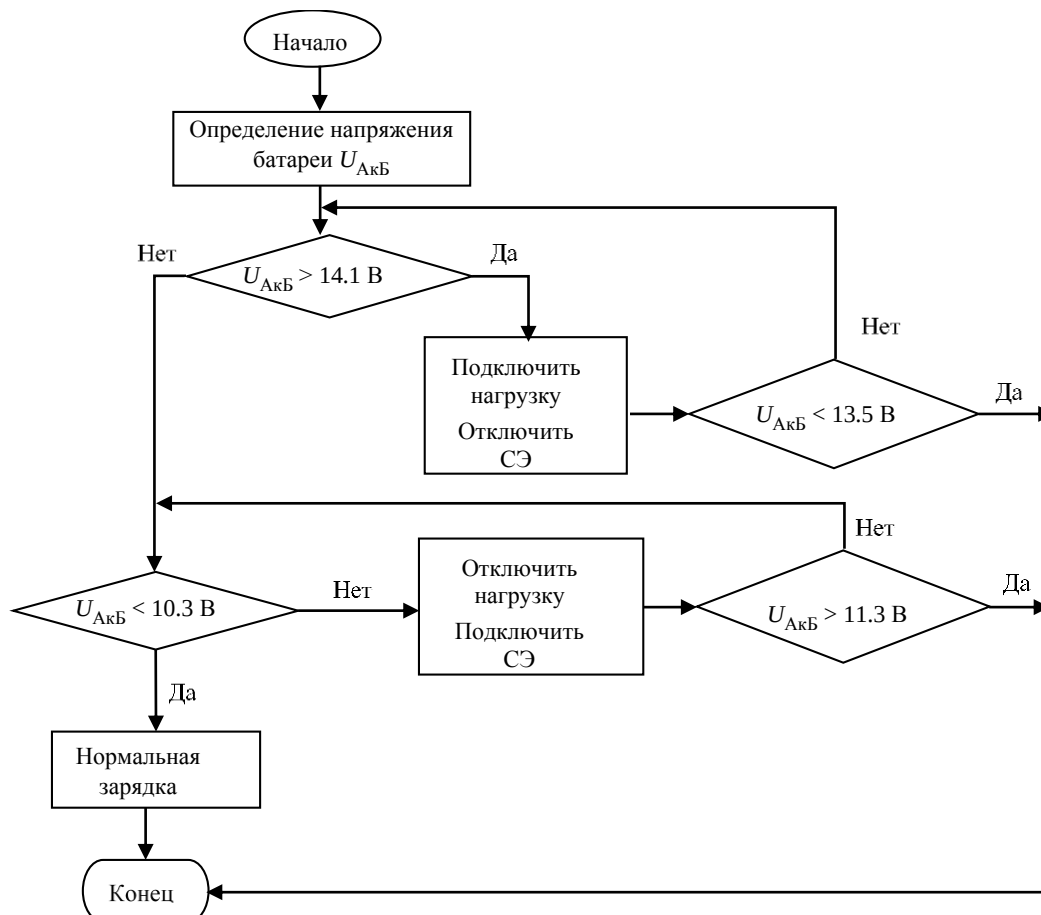


Рис. 4

Схема работы. На схеме представлен понижающий преобразователь (Buck Converter 3A) с регулятором IC LM2596, имеющим регулируемый диапазон выходного напряжения 1.23–37 В, гарантированный выходной ток нагрузки 3 А, диапазон входного напряжения до 40 В. Полная принципиальная схема LM2596 показана на рис. 5 (1.2–37 В; регулируемый источник питания 3.0 А с низкой выходной пульсацией (схема включения LM2596)).

Полная схема разработанного солнечного контроллера заряда представлена на рис. 6.

Описанный контроллер заряда был создан в соответствии с точными характеристиками про-

цесса зарядки аккумулятора, которая может производиться при постоянном напряжении или постоянном токе. В данном случае процесс зарядки выполняется методом постоянного напряжения. При этом методе в начале зарядки напряжение АКБ увеличивалось с низкого до высокого уровня, а ток уменьшался с высокого до низкого уровня. Например, начальный уровень разряженной батареи составляет 10.3 В для 12-вольтовой батареи, и когда происходит зарядка, уровень напряжения сначала увеличивается до номинального зарядного напряжения 14.1 В. По мере того как начальный зарядный ток 1 А подается на батарею, в процессе зарядки он будет понижаться.

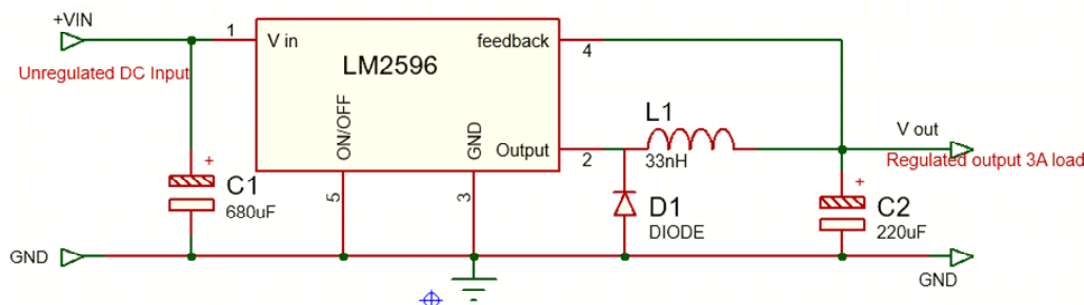


Рис. 5

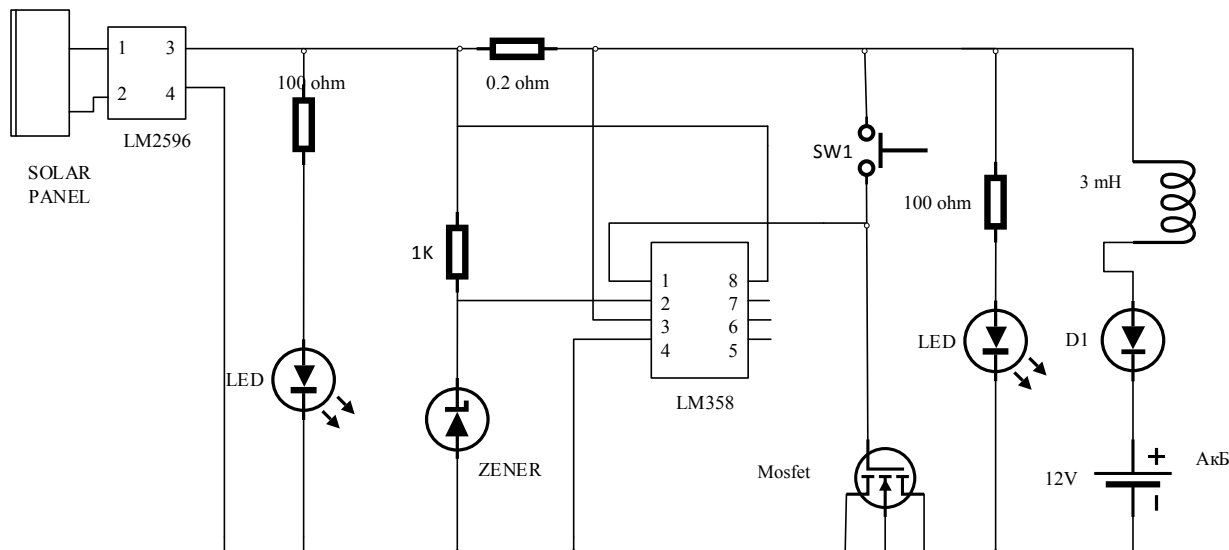


Рис. 6

Когда напряжение батареи достигнет 14.1 В, ток на батарее будет резко уменьшен до 50 мА, и эта схема будет автоматически отключена от панели с АкБ. В качестве переключателя используется MOSFET (МОП-транзистор, металлоокисный полупроводник). Переключение MOSFET контролируется операционным усилителем (ОПУ), который используется в качестве компаратора. ОПУ сравнивает два входа, один из которых – опорное напряжение, которое генерируется стабилитроном (Zener diod), а второй – ток АкБ в виде переменного напряжения.

Результаты эксперимента и обсуждения. Экспериментальное тестирование зарядки при помощи разработанного контроллера заряда было проведено на свинцово-кислотной АкБ 12В–15А · ч. Табл. 2 показывает результаты тестирования солнечной панели с этим аккумулятором.

Технические параметры используемой панели: максимальная мощность = 40 Вт; оптимальное напряжение или напряжение при пиковой мощности $U_{opt} = 17.35$ В; оптимальный рабочий ток $I_{opt} = 2.31$ А; разрыв в цепи напряжения пита-

ния или напряжение холостого хода $U_{x,x} = 21.16$ В; ток короткого замыкания $I_{к,з} = 2.53$ А.

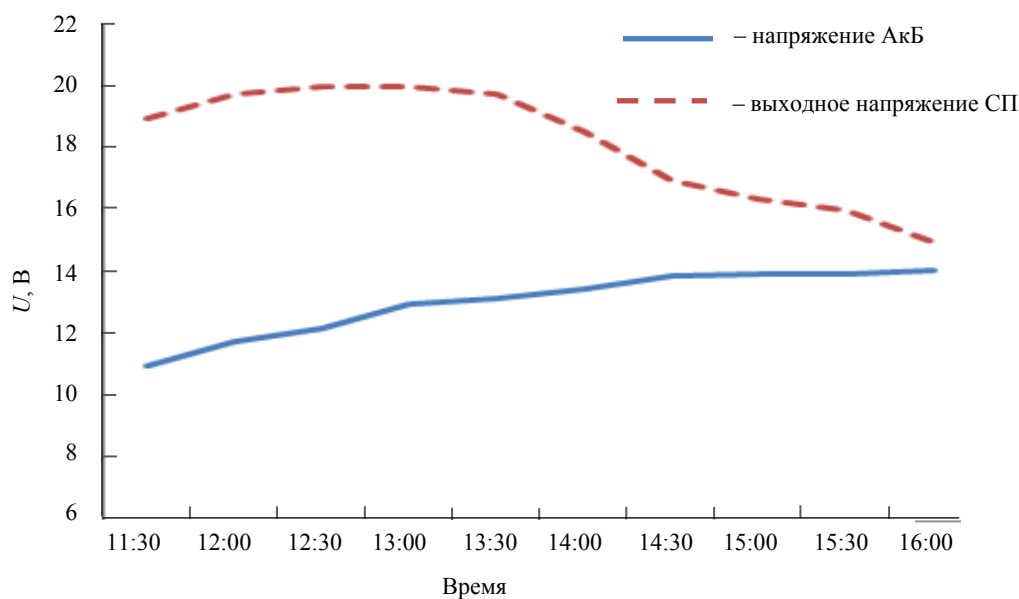
Напряжение зарядки солнечной панели было отмечено и зарегистрировано в начале эксперимента, который проводился с 11:30 до 16:00. Значения напряжения и тока были записаны через каждые 30 мин. Эксперимент продолжался, пока батарея не зарядилась полностью. Результаты экспериментального тестирования зарядки с аккумулятором 12 В, 15 А · ч показаны в табл. 2.

График зависимости напряжения аккумуляторной батареи от времени зарядки показан на рис. 7.

Из табл. 2 видно, что в начале тестирования напряжение на панели было 19 В, а на АкБ – 11 В, что обеспечивает разность потенциалов, необходимую для протекания тока от солнечной панели к АкБ. В это время АкБ заряжается. Можно отметить, что напряжение солнечной панели стабильно увеличивалось с 11:30 до 12:30, со значениями от 19 до 20 В соответственно (пик в 12:30), затем постепенно снижалось до 18.6 В в 14:00. Солнечное излучение в Республике Бурунди в это время

Таблица 2

Время	Выходные значения солнечной панели		Состояние зарядки АкБ	
	Выходное напряжение U , В	Выходной ток I , А	Выходное напряжение U , В	Выходной ток I , А
11:30	19.0	1.20	11	1.00
12:00	19.8	1.40	11.8	0.90
12:30	20.0	1.50	12.2	0.70
13:00	20.0	1.80	13	0.60
13:30	19.8	2.00	13.2	0.50
14:00	18.6	1.60	13.5	0.35
14:30	17.0	1.40	13.9	0.20
15:00	16.4	1.30	14.0	0.15
15:30	16.0	1.20	14.0	0.10
16:00	15.0	1.00	14.10	0.05



достигает максимума, и видно, что и ток солнечной панели повышается от 1.20 А в 11:30 до 2.00 А в 13:30, а потом немного падает.

Разработан контроллер, позволяющий управлять зарядом батареи с оптимальными значениями тока и напряжения.

Контроллер для зарядки аккумулятора работает с топологией DC-DC-преобразователя. Система была реализована с использованием недорогих компонентов, разработанный контроллер заряда в сочетании с регулируемым напряжением и током подходит для автоматического включения-выключения режима заряда.

Стоимость общей системы контроллера солнечного заряда может понижаться в зависимости

от методов управления зарядкой АкБ, обеспечивающих высокий уровень заряда и срок службы аккумуляторной батареи в изменяющихся погодных условиях, которые приводят к прерывистой работе солнечной батареи. Надлежащее регулирование контроллера заряда обеспечивает максимизацию энергии, передаваемой на батарею, и таким образом, достигается лучшая эксплуатация солнечной батареи. Так как система зарядки работает с более высоким уровнем заряда, срок службы АкБ увеличивается. Результаты испытаний подтверждают, что использование предложенного метода приводит к лучшему использованию доступной солнечной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solar controller design with MPPT / S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G. Sow, A. Ndiaye, M. Thiam // Online Jan. Portals of African reviews «Cames Review – Applied

Science and Engineering control». 2015. Vol. 1, № 2. P. 104–108. URL: <http://publication.lecames.org/> (дата обращения 10.07.2019).

2. Lee J. H., Bae H. S., Cho B. H. Resistive control for a micro-controller photovoltaic battery charging system // IEEE Industrial Electronics Transactions. 2008. Vol. 55, № 7. P. 2767–2775.

3. Салман С., Синь А. И., Чжоуян В. У. Разработка контроллера заряда МРРТ на основе алгоритма Р – & – О для автономной фотоэлектрической системы мощностью 200 Вт. URL: <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0099-8> (дата обращения 15.07.2019).

4. Оптимальная зарядка аккумулятора с использованием солнечной фотоэлектрической системы в автономной системе постоянного тока / С. Ананд, Р. С. Фарсван, Б. Мангу, Б. Г. Фернандес // 6-я Междунар. конф. IET по силовой электронике, машинам и приводам (2012). URL: <https://www.crossref.org/iiPage?doi=10.1049%2Fсп.2012.0339> (дата обращения 19.07.2019).

5. Кумар М., Лама Д. Проектирование и разработка экономически эффективного автоматического отключения PV. Контроллер заряда с индикатором // IOSR по электротехнике и электронике (IOSR-JEEE). 2015. Т. 10, вып. 3. URL: www.iosrjournals.org (дата обращения 11.08.2019).

6. LDO-регуляторы. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/micro/doc/50621/> (дата обращения 18.08.2019).

7. Экономичный контроллер солнечной зарядки / А. Рахаман, М. А. Матин, А. Саркер, Р. Уддин // IJRET: Междунар. журн. иссл. в обл. техники и технологий. 2015. № 3. URL: <http://www.ijret.org> (дата обращения 19.08.2019).

8. Регуляторы серии LM2596. URL: <https://rudatasheet.ru/datasheets/dc-dc-lm2596/> (дата обращения 20.08.2019).

N. Ntawuhorakomeye

Saint Petersburg Electrotechnical University

L. Ndayragije

Burundi State University

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A COST-EFFECTIVE SOLAR CHARGE CONTROLLER FOR AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANT

Currently, the use of solar energy is growing in demand due to increased energy requirements and the depletion of non-renewable sources. But the problem with solar energy is that it is not constant; and depends on weather conditions, such as solar radiation, temperature, that's why the battery is always connected between the solar panel and the load through the charge controller, to protect the battery from overload and deep discharge. In this article, an economical and efficient solar electrical controller with a circuit breaker and indicator was designed and developed, taking into account the climatic conditions of the Republic of Burundi.

This solar charge controller works with the topology of a DC-DC converter to charge the battery. The system is implemented using low-cost and limited hardware components. The developed solar charge controller, in combination with adjustable voltage and current, is suitable for automatic on-off. To increase the service life, the battery recharge cycle is optimized, and due to the reduction of the recharge cycle, the battery life is increased. An integrated IC was used in our system to regulate the voltage of the DC / DC converter. The system architecture for a regulated power supply with an output of 14 V and 3 A is described. The presented system uses resistive control to limit the output signal of a DC / DC converter, as well as to limit voltage or current.

Test results confirm that the use of the proposed method leads to a better use of available solar energy.

Charge controller, battery, DC/DC converter, microcontroller, resistive control

Айвазян Вагаришак Мгерович

Студент гр. 4285 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (921) 408-38-14
E-mail: vaghik007@mail.ru

Алексеев Николай Игоревич

Вед. науч. сотр. инжинирингового центра
«ЦМИД» СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р физ.-мат. наук.
Тел.: (812) 234-27-57
E-mail: nialekseyev@yandex.ru

Базарова Саяна Бимбаевна

Аспирантка лаборатории физики молекулярных структур института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН).
Тел.: +7 (914) 836-60-05
E-mail: baz_say@mail.ru

Белов Михаил Петрович

Зав. кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», профессор, д-р техн. наук.
Тел.: +7 (921) 745-67-58
E-mail: milesa58@mail.ru

Бройко Антон Петрович

Ст. науч. сотр. инжинирингового центра «ЦМИД» СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.
Тел.: +7 (921) 970-68-09
E-mail: broyko@mail.ru

Вагин Антон Владимирович

Студент гр. 4583 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (921) 561-34-99
E-mail: av.vagin@bk.ru

Герасимов Игорь Владимирович

Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук, профессор, действительный член (академик) Международной академии наук Высшей школы (МАН ВШ).
Тел.: (812) 234-36-75
E-mail: IVGerasimov-45@yandex.ru

Гулгенов Чингис Жаргалович

Ст. науч. сотр. лаборатории физики молекулярных структур Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), канд. техн. наук.
Тел.: +7 (914) 988-88-74
E-mail: sigfizik@mail.ru

Гурин Андрей Викторович

Студент гр. 4891 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: (812) 234-25-03
E-mail: gurin-andreyv@ya.ru

Инюкина Анастасия Михайловна

Студентка гр. 4583 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (953) 146-82-74
E-mail: nast050244@mail.ru

Калёнов Владимир Евгеньевич

Инженер кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: (812) 234-27-57
E-mail: vekalynov@gmail.com

Карасев Дмитрий Сергеевич

Студент гр. 4404 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (911) 943-31-70
E-mail: karasevsdmitry@yandex.ru

Кузьмин Сергей Алексеевич

Старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.
Тел.: +7 (921) 332-51-56
E-mail: KSA84@yandex.ru

Куракина Наталия Игоревна

Доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.
Тел.: (812) 234-93-93
E-mail: NKurakina@gmail.com

Лань Нгуен Ван

Аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (900) 659-49-59
E-mail: lanhnavy@gmail.com

Мельник Владлен Сергеевич

Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (911) 123-11-06
E-mail: hack-me@list.ru

Михайлова Алина Алексеевна

Студентка гр. 6586 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
Тел.: +7 (981) 801-45-02
E-mail: mikh.alina.phtl@gmail.com

Назаренко Николай Александрович

Зам. зав. кафедрой информационных систем
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (921) 757-90-65

E-mail: nicolas@ergoit.ru

Ндайрагиже Леонидас

Ассистент, зам. зав. кафедрой электромеханики
факультета инженерных наук государственного
университета Бурунди, Бужумбура.

Тел.: (257) 79-044-848

E-mail: leonidasndayiragije7@gmail

Нтавухоракомейе Ноэль

Аспирант кафедры робототехники и автоматизации
производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (965) 001-21-60

E-mail: noentaw1@mail.ru

Падерно Павел Иосифович

Профессор кафедры информационных систем
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук, профессор.

Тел.: +7 (921) 090-40-31

E-mail: pipaderno@list.ru

Пазников Алексей Александрович

Ст. науч. сотр. кафедры вычислительной техники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (964) 374-47-11

E-mail: apaznikov@gmail.com

Пантелеев Михаил Георгиевич

Доцент кафедры вычислительной техники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 312-89-28

E-mail: mpanteleyev@gmail.com

Рудинский Александр Вадимович

Зам. ген. директора по науке и научно-производственным связям ЗАО «Научно-производственный центр „Акварин“». Д-р техн. наук, действительный член (академик) Российской академии естествознания (РАЕ).

Тел.: (812) 445-23-60

E-mail: avkar@mail333.com

Салимов Анушервон Фирдавсович

Аспирант 1-го года обучения кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (965) 018-42-52

E-mail: safmail96@gmail.com

Сафьянников Николай Михайлович

Доцент кафедры вычислительной техники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 234-60-77

E-mail: NMSafyannikov@etu.ru

Симаков Иван Григорьевич

Ст. науч. сотр. лаборатории физики молекулярных структур Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), канд. физ.-мат. наук.

Тел.: +7 (902) 160-50-96

E-mail: sigfizik@mail.ru

Татаринцев Николай Иванович

Старший преподаватель кафедры робототехники и автоматизации производственных систем
СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (921) 741-78-95

E-mail: ntatarintsev@yandex.ru

Тестов Дмитрий Олегович

Студент гр. 4283 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (952) 391-60-94

E-mail: dtestov@bk.ru

Хмельницкий Иван Константинович

Ст. науч. сотр. инженерингового центра «ЦМИД» СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. хим. наук.

Тел.: +7 (921) 755-50-37

E-mail: khmelnitskiy@gmail.com

Чыонг Динь Данг

Аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: +7 (900) 637-26-97.

E-mail: dinh dangtruong@gmail.com



INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alekseev Nikolay Igorevich

Leading researcher of the engineering center «CMID» of Saint Petersburg Electrotechnical University, doctor of physical and mathematical sciences.

Phone: (812) 234-27-57

E-mail: nialekseyev@yandex.ru

Ayvazyan Vagarshak Mgerovich

Student of gr. 4285 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (921) 408-38-14

E-mail: vaghik007@mail.ru

Bazarova Sayana Bimbaevna

Postgraduate student of Laboratory of Physics of Molecular Structures of Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPMS SB RAS).

Phone: +7 (914) 836-60-05

E-mail: baz_say@mail.ru

Belov Mikhail Petrovich

Professor. Head of the department of robotics and automation of manufacturing systems of Saint Petersburg Electrotechnical University, D. Sc. in Engineering.

Phone: +7 (921) 745-67-58

E-mail: milesa58@mail.ru

Broyko Anton Petrovich

Senior researcher of the engineering center «CMID» of Saint Petersburg Electrotechnical University, Ph. D. in engineering.

Phone: +7 (921) 970-68-09

E-mail: broyko@mail.ru

Gerasimov Igor Vladimirovich

Professor of the department of CAD of Saint-Petersburg state electrotechnical university, doctor of science, professor, academician of the International Higher Education Academy of Sciences (IHEAS).

Phone: (812) 234-36-75

E-mail: IVGerasimov-45@yandex.ru

Gulgenov Chingis Zhargalovich

Senior Researcher Laboratory of Molecular Structure Physics of Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPMS SB RAS).

Phone: +7 (914) 988-88-74

E-mail: sigfizik@mail.ru

Gurin Andrey Viktorovich

Student of gr. 4891 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: (812) 234-25-03

E-mail: gurin-andreyv@ya.ru

Inyukina Anastasia Micha'lovna

Student of gr. 4583 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (953) 146-82-74

E-mail: nast050244@mail.ru

Kalyonov Vladimir Evgenyevich

Engineer of the department of micro and nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: (812) 234-27-57

E-mail: vekalynov@gmail.com

Karasyov Dmitry Sergeevich

Student of gr. 4404 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (911) 943-3170

E-mail: karasevsm Dmitry@yandex.ru

Khmelnitsky Ivan Konstantinovich

Senior researcher of the Engineering Center «CMID» Saint Petersburg Electrotechnical University, Ph. D. in engineering.

Phone: +7 (921) 755-50-37

E-mail: khmelnitskiy@gmail.com

Kurakina Natalia Igorevna

Associate professor of the department information measuring system and technologies» of Saint Petersburg Electrotechnical University, Ph. D. in engineering.

Phone: (812) 234-35-53

E-mail: NKurakina@gmail.com

Kuzmin Sergey Alekseevich

Senior lecturer of the department of CAD of Saint Petersburg Electrotechnical University, Ph. D. in engineering.

Phone: +7 (921) 332-51-56

E-mail: KSA84@yandex.ru

Lanh Nguyen Van

The post-graduate student of the department of robotics and automation of manufacturing systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (900) 659-49-59

E-mail: lanhnavy@gmail.com

Melnik Vladlen Sergeevich

Postgraduate student of the department of CAD system of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (911) 123-11-06

E-mail: hack-me@list.ru

Mikhaylova Alina Alexeevna

Student of gr. 6586 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (981) 801-45-02

E-mail: mikh.alina.phtl@gmail.com

Nazarenko Nikolay Alexandrovich

Deputy Head of the department of information systems of Saint Petersburg Electrotechnical University, associate professor, Ph. D. in engineering.

Phone: +7 (921) 757-90-65

E-mail: nicolas@ergoit.ru

Ndayragije Leonidas

Assistant, Deputy Head of the department of electromechanics of faculty of engineering of State University of Burundi, Bujumbura.

Phone: (257) 79 044 848

E-mail: leonidasndayiragije7@gmail.com

Ntawuhorakomeye Noel

Post-graduate student of the department of robotics and automation of production systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (965) 001-21-60

E-mail: noentaw1@mail.ru

Paderno Pavel Iosifovich

Professor of the department of information systems of Saint Petersburg Electrotechnical University, doctor of technical sciences, professor.

Phone: +7 (921) 090-40-31

E-mail: pipaderno@list.ru

Panteleev Michael Georgievich

Docent of the department of computer science of Saint Petersburg Electrotechnical University, Ph. D. in engineering.

Phone: +7 (921) 312-89-28

E-mail: mpanteleyev@gmail.com

Paznikov Alexey Alexandrovich

Senior researcher of the department of computer science and engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University, Ph. D. in engineering.

Phone: +7 (964) 374-47-11

E-mail: apaznikov@gmail.com

Rudinsky Aleksandr Vadimovich

Deputy general director for science and research and production relations of the CJSC «Research and production center „Akvmarin“», doctor of science, academician of the Russian Academy of Natural History (RANH).

Phone: (812) 445-23-60

E-mail: avkar@mail333.com

Safyannikov Nikolay Mikhailovich

Associate professor of Computer Science and Engineering department, Ph. D. in engineering, docent.

Phone: (812) 234-60-77

E-mail: NMSafyannikov@etu.ru

Salimov Anushervon Firdavsoyevich

Postgraduate student of the department of computer science and engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (965) 018-42-52

E-mail: safmail96@gmail.com

Simakov Ivan Grigorievich

Senior researcher laboratory of molecular structure physics of Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPMS SB RAS), candidate of Physical and Mathematical Sciences.

Phone: +7 (902) 160-50-96

E-mail: sigfizik@mail.ru

Tatarintsev Nikolay Ivanovich

Assistant Professor of the department of robotics and automation of industrial systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (921) 741-78-95

E-mail: ntatarintsev@yandex.ru

Testov Dmitri Olegovich

Student of gr. 4283 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (952) 391-60-94

E-mail: dtestov@bk.ru

Truong Dinh Dang

The post-graduate student of the department of robotics and automation of manufacturing systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (900) 637-26-97

E-mail: dinhdangtruong@gmail.com

Vagin Anton Vladimirovich

Student of gr. 4583 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (921) 561-34-99

E-mail: av.vagin@bk.ru

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» необходимо представить:

- файлы на CD-диске (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допускается передача материалов по электронной почте):
 - рукопись статьи;
 - сведения об авторе (-ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
 - рукопись статьи (статья должна быть объемом не менее 6 маш. с., обзорная статья – до 20 маш. с.);
 - сведения об авторе (-ах);
 - рекомендация кафедры с указанием наименования тематического раздела, в котором предполагается опубликование материала;
 - экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати;
 - сопроводительное письмо (только для авторов, не работающих (не обучающихся) в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Сведения об авторах должны содержать:

1. Фамилию, имя, отчество (полностью) автора.
2. Основное место работы.
3. Должность.
4. Ученую степень, ученое звание.
5. Контактный телефон, адрес электронной почты.

Все сведения печатаются в строку (без пунктов) на русском и английском языках.

Правила оформления текста статьи

Статья должна быть тщательно отредактирована, содержать признаки научной публикации:

- текстовый редактор Microsoft Word версии не ниже 97;
- формат бумаги А4;
- параметры страницы: поля – верхнее, нижнее и левое 2,5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;

- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 10,5 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзацным отступом 0,6 см; междустрочный интервал «Множитель 1.1»; автоматическая расстановка переносов.

На первой странице указывается индекс УДК (в левом верхнем углу; шрифт «Times New Roman» 14 pt; междустрочный интервал одинарный); далее даются инициалы и фамилии авторов, затем основное место работы, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на русском языке. Инициалы и фамилии авторов, основное место работы, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на английском языке размещаются в конце публикации после библиографического списка.

Перечень авторов разделен запятыми, инициалы перед фамилиями (шрифт «Times New Roman» 11,5 pt, обычный; выравнивание по левому краю; абзацный отступ слева 0,6 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 20 pt, после 8 pt; междустрочный интервал одинарный).

Основное место работы набирается строчными буквами (шрифт «Times New Roman» 11,5 pt, курсив; выравнивание по левому краю; абзацный отступ слева 0,6 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 0 pt, после 8 pt; междустрочный интервал одинарный).

Название статьи набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 15 pt; полужирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 12 pt, после 12 pt; междустрочный интервал одинарный).

Аннотация содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 8,5 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 0,6 см; интервалы перед абзацем 6 pt, после 0 pt; междустрочный интервал одинарный).

Ключевые слова состоят из 3–10 слов и словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми, в конце их перечисления точка не ставится; шрифт «Times New Roman» 9,5 pt, полужирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 12 pt, после 12 pt; междустрочный интервал одинарный).

Далее следует текст статьи.

После основного текста следует библиографический список, который включает:

➤ *заголовок «Список литературы»* набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 11 pt, жирный; выравнивание по центру; интервалы перед абзацем 12 pt, после 8 pt; междустрочный интервал одинарный);

➤ *библиографическое описание источника* с порядковым номером ссылки на него по тексту, начиная с первого, выполненное по ГОСТ 7.3–2003. Библиографическое описание документа. Введ. 01.07.2004 / Госкомстандарт. М., 2004 (отдельным абзацем; шрифт «Times New Roman» 8,5 pt; первая строка с абзацным отступом 0,6 см; выравнивание по ширине; междустрочный интервал одинарный).

Библиографический список не должен превышать 10 (для обзорных заказных статей – 20) наименований: приводятся только источники, на которые есть ссылки в тексте (ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются).

Сноски постраничные. Нумерация сносок сквозная в рамках страницы (шрифт «Times New Roman» 9 pt, обычный; выравнивание по ширине; междустрочный интервал одинарный).

Для создания *формул* используется редактор MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 10,5 pt, «подстрочный» 9 pt, «под-подстрочный» 7 pt, «символ» 14,5 pt, «подсимвол» 12,5 pt; стили: текст, функция, число – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», полужирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

При наборе формул без использования редактора формул индексы ставятся размером 9 pt со смещением на 3 pt вверх или вниз (Главная → Шрифт → Дополнительно → Смещение) в зависимости от того, надстрочный или подстрочный индекс. Не использовать Шрифт → Видоизменение → надстрочный/подстрочный. Если у величины есть одновременно и надстрочные, и подстрочные символы, то формула создается только в редакторе MathType.

Формулы, помещенные на отдельной строке, набираются с интервалами: перед формулой 4 pt, после 4 pt; междустрочный интервал одинарный.

На каждый рисунок и таблицу в тексте статьи необходимо дать ссылку. Каждый рисунок и таблица должны быть пронумерованы (напр.: рис. 1, табл. 3).

Текст в *таблицах* печатается через одинарный интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 9 pt, индексы 7 pt, подындекс 5,5 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце, интервал после 4 pt; выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом). Ширина таблицы не более 7,9 см, большие таблицы – не более 16,5 см, интервал после нее 6 pt.

Рисунки в электронном виде и подписи к ним создаются средствами Word или другими программами (CorelDRAW, Visio, Adobe Illustrator, Excel (с предоставлением оригинала рисунка в электронном виде)) в черно-белом виде. Качество рисунков и фотографий (в форматах .jpeg, .tiff) должно быть не менее 300 dpi. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) 0,6 pt. Не допускается вставлять рисунки в рамки или полотно.

Описание содержания рисунка, а также введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи. Подпись под рисунком содержит только его номер (шрифт «Times New Roman», курсив, 9 pt) и располагается по центру под рисунком (например, *Рис. 1*). Все тексты и обозначения на рисунке даются шрифтом размером 9 pt, индексы 7 pt, подындексы 5,5 pt с одинарным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 9 pt) ставятся под фрагментом перед нумерационным заголовком; в тексте ссылка на фрагмент ставится после нумерационного заголовка через запятую (например, рис. 1, *a*); интервалы перед рисунком и после него 6 pt. Ширина рисунка не более 7,9 см, большие рисунки – не более 16,5 см.

Перечень основных тематических направлений журнала:

- Физика.
- Информатика, вычислительная техника и управление.
- Электротехника.

Рукописи аспирантов печатаются бесплатно.

Технические вопросы можно выяснить по адресу: Izvestiya-leti@yandex.ru
