

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Ежемесячный журнал

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

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

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Ежемесячный журнал



ФИЗИКА

Горяинов В. С., Бузников А. А., Костиков Е. В. Модернизация портативного спектрометра РСС	. 5
<i>Дурукан Я., Перегудов А. Н., Шевелько М. М.</i> Эффекты объемных акустических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды	17
Аббакумов К. Е., Бобриков И. С., Вагин А. В. Исследование приемного тракта гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре	27
<i>Пестерев И. С., Степанов Б. Г.</i> Обобщенная модель преобразователя волноводного типа. Задача синтеза	35
<i>Мамыкин А. И., Шишкина М. Н.</i> Формирование структур пониженной размерности на энергетически неоднородной поверхности полупроницаемых мембран	46

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Куракина Н. И., Мышко Р. А. ГИС моделирования нефтяных разливов	
на магистральных трубопроводах	. 52
Иванов А. В., Ваганов В. В., Билецкий Н. А. Разработка алгоритма динамического планирования полиграфического производства посредством рейтинговой системы	. 60

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Правила представления рукописей авторами	98
Сведения об авторах	.94
Дзлиев С. В. Ведущая научно-педагогическая школа «Электротехнология» – исследования и разработки	. 84
<i>Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.</i> Векторно-матричное нечеткое управление частотой вращения свободной турбины турбовинтового двигателя	78
Носиров И. С., Белов А. М. Оптимизация параметров процесса резания токарного станка с ЧПУ с использованием генетического алгоритма	73
Комарова Г. В., Круглов С. А. Оценка надежности автоматизированной системы контроля параметров турбогенератора	67

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

Подписано в печать 14.02.20. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 12,87. Печ. л. 12,5. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–120 экз.) Заказ 4.

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

2'2020

Izvestiya SPbGETU «LETI»

2'2020

Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal

Monthly journal



PHYSICS

Goryainov V. S., Buznikov A. A., Kostikov E. V. Redesigning the portable RSS spectrometer	5
Durukan Ya., Peregudov A. N., Shevelko M. M. Effects of bulk acoustic waves propagating orthogonal to the rotation axis of the medium	17
Abbakumov K. E., Bobrikov I. S., Vagin A. V. The study of the reception tract of a flexible extended towed antenna at a circular overview	27
Pesterev I. S., Stepanov B. G. Generalized model of the transducer of waveguide type. Synthesis problem	35
Mamykin A. I., Shishkina M. N. Low dimensional structures formation on energetically inhomogeneous surface of semipermeable membranes	46
INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGIES AND CONTROL	
Kurakina N. I., Myshko R. A. Landscape modeling of oil emergency spills using GIS	52
<i>Ivanov A. V., Vaganov V. V., Biletsky N. A.</i> Development of an algorithm for dynamic planning of polygraphic production by means of a rating system	60
ELECTRICAL ENGINEERING	
Komarova G. V., Kruglov S. A. Reliability assessment of automated monitoring system of turbogenerator's parameters	67
<i>Nosirov I. S., Belov A. M.</i> Optimization of parameters of a CNC lathe cutting process using a genetic algorithm	73
<i>Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A.</i> Vector matrix fuzzy control of the rotational speed of a turboprop engine free turbine	78
Dzliev S. V. Leading scientific and pedagogical school «Electrotechnology» – research and development	84
Information about the authors	94

-							
Rules of	presentation and	preparation of	f manuscrints	a offered for	' iournal	nublication	98
mailes of	presentation and		manascripis	offereu jor	journar	<i>pnoncunon</i>	

Editor N. V. Lukina DTP Professional I. S. Belyaeva Editorial adress: 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 681.785.554

В. С. Горяинов, А. А. Бузников, Е. В. Костиков Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Модернизация портативного спектрометра РСС

Пассивные спектральные измерения играют центральную роль в современном дистанционном зондировании Земли из космоса. Первые спектральные наблюдения земной поверхности и атмосферы с орбиты были выполнены экипажами советских космических кораблей начиная с «Союза–5», а также орбитальных станций «Салют-3» и «Салют-4». Важным инструментом для проведения этих экспериментов стал ручной спутниковый спектрометр РСС в нескольких последовательных модификациях. Позже на основе его конструкции был создан полевой фотоэлектрический спектрометр, в котором в качестве регистрирующего элемента была применена фотодиодная линейка (вместо фотопленки в исходной конструкции РСС), а управление осуществлялось микроконтроллером. Удачная оптическая конструкция спектрометра и значительно расширившиеся в последние годы возможности микроконтроллерной техники подвели авторов к идее модернизации РСС. В статье описана конструкция спектрометра, полученного в результате модернизации, и его основные технические характеристики. Приведены примеры обзорных работ о современных тенденциях в космическом дистанционном зондировании, а также краткая справка о первых спектральных измерениях из космоса. Рассмотрены особенности конструкции спектрометра РСС и его последующих модификаций.

Дистанционное зондирование Земли, спектрометрия природных объектов, портативный спектрометр, система управления спектрометром, Arduino-совместимые микроконтроллеры

Глаз в сочетании с мозгом можно считать первой оптико-электронной системой, позволившей человеку начать наблюдение Земли из космоса [1], [2]. Эта уникальная природная оптическая система до сих пор остается непревзойденной по чувствительности, контрастности, а главное, по анализу наблюдаемых оптических явлений [3]. Она позволила выполнить ряд уникальных наблюдений и открытий [4]. Однако ее ограниченный спектральный диапазон и физическая уязвимость потребовали создания новых оптических систем для исследования природной среды из космоса. Первоначально это были фотоаппараты с широким или узким спектральным диапазоном, с разной спектральной чувствительностью и быстродействием. Спектральная чувствительность улучшалась за счет выделения более узких спектральных участков с помощью различных фильтров. Применение цифровой технологии и современных диспергирующих систем позволило создать видеоспектрометры, в которых каждое изображение соответствует узкому спектральному диапазону $\Delta\lambda$ [5].

Исторически первыми спектральными приборами в космосе стали пассивные спектрометры, которые регистрировали отраженное и рассеянное природными объектами солнечное излучение.

В настоящее время наибольший объем информации из космоса о состоянии атмосферы и поверхности Земли получают при помощи гиперспектральной и многоспектральной сканирующей аппаратуры [6]. Преимуществом фотографических и многоспектральных изображений является пространственная и факторная интеграция и связанные с ней возможности комплексного анализа закономерностей пространственно-временной изменчивости разнообразных характеристик природных образований. Однако одних только данных о пространственном распределении поля яркости в какой-либо области спектра, характеризуемом изображением, недостаточно. Нужны количественные методы анализа спектров природных образований, которые лежат в основе космической спектрофотометрии природной среды.

Космическая спектрофотометрия природной среды определена как научное направление, предусматривающее разработку методов и приборов для измерения из космоса спектров отражения, поглощения и рассеяния солнечного излучения природными образованиями и оптических характеристик природной среды (спектральных коэффициентов отражения, поглощения, излучения, степени поляризации, спектральных яркостей и контрастов). Это научное направление имеет целью изучение существующих в природе зависимостей характеристик поля электромагнитного излучения, измеряемых с космических летательных аппаратов, от параметров природной среды – таких, например, как типы и состояние природных объектов, концентрация газовых компонентов и аэрозоля на разных высотах в атмосфере, состояние поверхности Мирового океана [7]. Космическая спектрофотометрия природной среды опирается на научный фундамент классической фотометрии с ее строгой системой теоретических положений, расчетов и количественных методов измерения лучистой энергии. Спектральные измерения с космических аппаратов выполняются через толщу земной атмосферы, и поэтому важное место в них занимают проблемы переноса излучения в реальной сферической атмосфере. Космическая спектрофотометрия включает ряд методов измерений, среди которых наибольшее применение нашли метод спектральных измерений отраженного и рассеянного системой «Земля - атмосфера» солнечного излучения и метод измерения прозрачности атмосферы по Солнцу на скользящих оптических трассах [8], [9].

Возможность использования данных дистанционного зондирования для получения информации о состоянии атмосферы, поверхности океана и природных образований на поверхности Земли для практического решения на этой основе многочисленных экологических проблем определяется прежде всего знанием существующих в природе зависимостей характеристик поля электромагнитного излучения от параметров природной среды – состояния растительности и свойств грунта, концентрации газовых компонентов и аэрозоля на разных высотах в атмосфере, состояния поверхности Мирового океана и др.

Первым инструментом для ранних спектральных наблюдений Земли из космоса стал ручной спутниковый спектрометр РСС. Впервые спектральные исследования атмосферы и природных образований на поверхности Земли были проведе-

ны на космических кораблях «Союз-5», «Союз-7», «Союз-9» и на орбитальной станции «Салют» с помощью спектрографа РСС-2 [10], [11]. На орбитальных станциях «Салют-3» и «Салют-5» использовался спектрограф РСС-3, вошедший в состав комплекса аппаратуры станции «Мир» [12]. В дальнейшем на борту различных космических кораблей применялись такие спектральные приборы, как многоспектральная сканирующая система МСС-2 [13], спектрометр МКС-М [14], спектрометрическая система СКИФ-М [15], мноспектрометры «Спектр-15» гоканальные И «Спектр-256» [16]. С учетом их преимуществ и недостатков спектрометр РСС оказался наиболее пригодным (по своему пространственному разрешению и размеру поля зрения) как для съемок Земли из космоса, так и для проведения самолетных и наземных измерений.

Одновременное применение спектрометра РСС-3 в составе аппаратуры орбитальной станции «Мир» и на борту средств малой авиации (Ан-2, Ми-8, Ка-26) в ходе совмещенного подспутникового эксперимента позволило оценить влияние спектрального пропускания атмосферы на альбедо природных объектов при их дистанционной съемке из космоса [11], [17]. В ходе комплексного многоуровневого эксперимента «Внутренние водоемы - 86» с помощью спектрометров РСС были выполнены спектральные съемки Рыбинского водохранилища с борта судов и самолета [18]. В июле 1990 г. была проведена съемка различных видов поверхности в Лапландском биосферном заповеднике с борта вертолета. Полученные данные совместно с данными многоспектрального сканирующего радиометра, установленного на спутнике «Космос-1939», и результатами химического анализа контактных проб снега позволили оценить влияние выбросов металлургических комбинатов в Апатитах и Мончегорске на состояние растительности и снежного покрова [19].

На рис. 1, *а* показан внешний вид прибора РСС-2М, а на рис. 2, *б* – более поздней его модификации РСС-3 с установленным телеобъективом.

Спектрометр выполнен по автоколлимационной схеме. Дифракционная решетка, наклоненная относительно оптической оси прибора, размещена в его задней части, внутри прямоугольного кожуха (рис. 1, *б*, слева). Сверху на корпус устанавливалась кассета с монохромной фотопленкой шириной 35 мм, на которую фиксировались результаты измерений. Механизм с ручным приво-







дом от курка, расположенного ниже объектива, обеспечивал перемотку пленки и взвод затвора после съемки очередного кадра.

В качестве примера результатов измерений с помощью спектрометра РСС на рис. 2 приведены условная схема построения кадра (рис. 2, а) и внешний вид кадра, содержащего спектр прямоугольного участка земной поверхности в долине Нила (рис. 2, б). В верхней части кадра расположено изображение объекта съемки 1, формируемое при помощи светоделительного куба (оптическая схема прибора более подробно будет рассмотрена далее) и использующееся для фотопривязки результатов измерений. Выделенная прямоугольная область 6 показывает проекцию входной щели спектрометра на исследуемую поверхность. Ниже находятся отметка о времени экспозиции кадра 4 и изображение циферблата часов 3, показывающее время съемки. Компактные механические часы входили в конструкцию





спектрометра, их изображение формировалось при помощи подсветки лампой накаливания, наклонного зеркала и собирающей линзы. Номером 5 выделены реперные отметки длин волн. Наконец, непосредственно спектральное распределение яркостей в области съемки показано в прямоугольной области 2 внизу кадра. Изображение на рис. 2, б – позитивное, т. е. большей спектральной яркости соответствуют более светлые области кадра. Обработка изображения выполнялась при помощи микрофотометра – прибора, определяющего светопропускание в выбранной точке кадра. С учетом зафиксированного времени экспозиции и известной светочувствительности пленки производился переход к численным значениям яркости в той или иной области спектра.

Удачная конструкция и хорошие оптические характеристики спектрометра РСС привели к идее его усовершенствования, которое заключалось в замене фотопленки как регистрирующего элемента набором фотоэлектронных приемников излучения. Вследствие этого был создан полевой фотоэлектрический спектрометр (ПФС) [20]. В качестве фотоприемника в нем была использована линейка из 48 фотодиодов с размерами 0.5×3 мм и расстоянием между соседними элементами 50 мкм. С учетом характеристик оптической системы угловой размер поля зрения прибора составил $50 \times 3'$, а пространственное угловое разрешение – 1' при использовании объектива с фокусным расстоянием 135 мм и 2' при использовании телеобъектива с фокусным расстоянием 300 мм. Рабочий спектральный диапазон прибора соответствовал длинам волн от 400 до 750 нм.

Регистрирующая часть прибора была разделена на блок фотоприемного устройства и блок обработки и индикации сигнала. Коммутатор соединял выходы фотодиодов с инвертирующими входами операционных усилителей, составлявших каскад предварительного усиления. Сигнал с выхода каждого канала предварительного усилителя подавался через 16-канальный коммутатор на вход вторичного усилителя, коэффициент усиления которого можно было изменять с панели управления в 2, 4, 8, 16 раз для соответствия условиям освещенности объекта съемки. Усиленный сигнал поступал на вход аналого-цифрового преобразователя, с выхода которого цифровой код записывался в оперативную память по адресу, соответствующему номеру канала, заданному для вторичного коммутатора. На цифровом табло могли отображаться номер спектрального канала вместе с цифровым значением из оперативной памяти, преобразованным при помощи дешифра-



тора. Ограниченное количество каналов коммутаторов позволяло выделять в рабочем диапазоне 20 спектральных полос, из которых только в любых 16 можно было проводить одновременные измерения и сохранять полученные значения. Полевой фотоэлектрический спектрометр использовал автономный источник питания.

С учетом недостатков ПФС его электронная часть была усовершенствована за счет передачи функций управления микроконтроллеру Microchip PIC16F877A. Данная модификация спектрометра получила обозначение ПФС-М [21]. В качестве фотоприемника была использована фотодиодная линейка из 64 элементов, что позволило регистрировать значения спектральной яркости в диапазоне 350...850 нм с разрешением 8 нм. Принцип построения аналоговой части схемы спектрометра показан на рис. 3.

Для простоты на рисунке показана обработка сигналов только четырех из каналов, многократные соединения (например, с общим проводом GND) и неиспользуемые выводы микросхем не показаны. Микроконтроллер формировал код, подающийся на управляющие входы (EN, A0 -АЗ) четырех 16-канальных мультиплексоров ADG706 (DA2). При этом выбирались четыре канала для одновременной регистрации (один из входов S1-S16 каждой микросхемы, для схемы на рисунке – каналы PH1–PH16), а с выходов мультиплексоров (D1) сигнал подавался на входы усилителей. Микросхемы AD8554 сочетают по четыре прецизионных операционных усилителя в одном корпусе, поэтому на основе двух таких микросхем были построены два усилительных каскада (DA3.1, DA3.2) для каждого из четырех каналов. Усиленный сигнал поступал на 4 аналоговых входа микроконтроллера (AN1-AN4), работающие как 10битные аналого-цифровые преобразователи. Для повышения точности преобразования в схеме был использован прецизионный источник опорного напряжения (5 В, на схеме обозначено +5V REF) типа REF195 (DA1). Во внутренней памяти микроконтроллера сохранялись 4 целых значения в диапазоне 0-1023. Затем формировался код, соответствующий следующей четверке каналов. Для регистрации 64 значений, составляющих полный спектр, этот цикл повторялся 16 раз.

Управление спектрометром осуществлялось при помощи четырех тактовых кнопок и знакогенераторного жидкокристаллического дисплея с 2 строками по 8 символов. Результаты измерений можно было выводить на дисплей и передавать на компьютер через последовательный порт. Питалась схема от батареи «Крона» 9 В.

Спектрометр ПФС-М применялся, в частности, для съемок спектров вод озера Сайма с целью определения корреляционных зависимостей между концентрацией компонентов природных вод и комбинациями спектральных яркостей отраженного солнечного излучения [22]. В ходе исследования были получены уравнения регрессии для восстановления концентрации кислорода, азота, натрия и фосфора в природных водах по результатам дистанционного зондирования.

Кроме того, с помощью этого прибора проводились полевые и лабораторные измерения спектров различных видов растительности на территории Приморского, Петроградского и Кировского районов Санкт-Петербурга для определения корреляционных связей спектральных индексов со степенью загрязнения тяжелыми металлами [23]. Сравнение спектров одуванчика лекарственного и мать-и-мачехи при различных уровнях загрязнения показало более высокую информативность спектров мать-и-мачехи для дистанционной оценки экологической обстановки.

Основным недостатком ПФС-М был, однако, малый размер внутренней памяти. Ограниченная емкость энергонезависимой флеш-памяти микроконтроллера PIC16F877A позволяла сохранять не более 32 спектров по 64 целочисленных 10-битных значения в каждом. Появление доступных, компактных и мощных микроконтроллеров привело авторов к идее новой конструкции спектрометра, включающей в себя GPS-приемник для регистрации времени и координат проведения съемки, а также позволяющей сохранять условия и результаты измерений на съемной SD-карте [24]. Оптико-механическая схема модернизированного спектрометра показана на рис. 4.

Оптическая часть прибора подверглась минимальным изменениям. Излучение от объекта съемки собирается входной оптической системой *l*, в качестве которой используется объектив с фокусным расстоянием 135 мм или телеобъектив с фокусным расстоянием 300 мм, крепящиеся к внешнему корпусу прибора байонетным соединением. Для регулировки входного светового потока в соответствии с динамическим диапазоном фотоприемника в систему добавлена револьверная диафрагма *3*, которая представляет собой диск с набором отверстий различного диаметра. Максимальное пропускание обеспечивает отверстие с диаметром, равным диаметру задней линзы объектива, а для регистрации темновых токов приемника один из секторов диафрагмы сделан сплошным. Диафрагма жестко закреплена на оси датчика угла поворота (энкодера) 4, передний конец оси свободно вращается в упоре 2.

Поскольку начиная с модели спектрометра ПФС часть оптической схемы, предназначенная для фотопривязки объекта съемки, более не использовалась, было решено преобразовать ее в видоискатель. Для этого светоделительный куб 5 повернули вокруг продольной оси прибора на 180°. Во внутреннем канале прицельной трубки установлена собирающая линза 6, которую можно перемещать в некоторых пределах для регулировки системы под индивидуальную остроту зрения, и зеркало 7, направляющее излучение в выходное отверстие.

На входе спектрометра излучение проходит через вертикальную входную щель 8 шириной 0.4 мм. Этот размер выбран так, чтобы не понизить спектральное разрешение, обеспечиваемое фотоприемником, и одновременно не уменьшить светосилу прибора.



Для калибровки спектрометра по излучению Солнца или другого источника в оптическом тракте помещен экран из молочного стекла 9, вращающийся вручную вместе с осью, перпендикулярной плоскости чертежа. При выполнении калибровки он устанавливается перпендикулярно оси прибора, при этом регистрируется распределение спектральных яркостей на его обратной стороне. Во время съемки экран укладывается горизонтально, на «пол» внутреннего корпуса оптической части.

Излучение раскладывается в спектр дифракционной решеткой 13 с 600 штрихами на миллиметр. Угол блеска решетки 12° обеспечивает сбор до 80 % излучения в рабочей области спектра. Решетка развернута против часовой стрелки относительно своей вертикальной оси – иными словами, ее ближний (относительно плоскости рис. 4) край находится дальше от объектива спектрометра, чем дальний. В соответствии с автоколлимационной схемой излучение дважды, до разложения в спектр и после, проходит через коллимационную собирающую линзу 12 с фокусным расстоянием 95 мм. В сочетании с параметрами решетки это дает линейную дисперсию 62 мм/мкм в первом порядке спектра в фокальной плоскости коллиматора. Наконец, наклонное зеркало 11 направляет излучение перпендикулярно главной оси прибора, на фотодиодную линейку 10.

Модульный принцип построения электронной части спектрометра ПФС-М позволил продолжить использование аналоговой платы с фотоприемником, мультиплексорами и операционными усилителями (рис. 3). Задачи управления спектрометром, первоначальной обработки результатов измерений, а также их сохранения были переданы микроконтроллерной плате MEGA 2560 PRO, построенной на базе AVR-микроконтроллера АТтеда2560 с тактовой частотой 16 МГц. Эта Arduino-совместимая плата содержит 256 Кбайт энергонезависимой флеш-памяти и 8 Кбайт динамической памяти, доступной для переменных во время выполнения программы. Отдельным ее преимуществом в соответствии с типом плат Arduino Меда – это наличие 4 последовательных портов, позволяющих одновременно связываться как с компьютером (например, в ходе отладки), так и с другими устройствами без необходимости в более медленной программной эмуляции порта.

На рис. 5 приведена схема соединений между микроконтроллерной платой MC, аналоговой платой A и другими компонентами спектрометра. Соответствие напряжений высокого и низкого логических уровней позволило подключить управляющие входы мультиплексоров EN, A0–A3 напрямую к цифровым выходам MC D2–D6. Аналоговый сигнал с выходов усилителей AN1–AN4 подается на аналоговые входы A0–A3 платы MC, работающие как 10-битные АЦП: значение 0 соответствует нулевому напряжению на входе, а 1023 – 5 В. Аналоговая плата потребляет и напряжение 9 В напрямую от батареи спектрометра, и стабилизированное напряжение 5 В от преобразователя на микроконтроллерной плате.

Для отображения информации прибор использует знакогенерирующий жидкокристаллический экран с 20 столбцами и 4 строками, обозначенный на схеме LCD. Для управления экраном (входы RS и E) и непосредственно передачи кодов символов (D4–D7) используются цифровые выходы MC D7-D12. Вывод экрана RW замкнут на общий провод, что задает режим работы только на вывод данных. Вывод VO подключен к подвижному контакту переменного резистора R1, позволяющего менять контрастность символов на Питается экран стабилизированным экране. напряжением 5 В. Аналоговый вывод МС А4 может методом широтно-импульсной модуляции устанавливать на входе LCD А различные напряжения, задавая таким образом яркость подсветки экрана. Второй вывод цепи подсветки соединен с общим проводом.

GPS-приемник NEO-6M, обозначенный на схеме GPS, обменивается данными с MC через последовательный порт на цифровых выводах D18, D19 со скоростью 9600 бод. Для его питания используется стабилизированное напряжение 3.3 В с выхода преобразователя MC.

Для сохранения данных измерений используется модуль чтения SD-карт (SD). Режим его работы задается управляющим входом CS, подключенным к цифровому выводу MC D53, а для синхронизации на вход CLK подаются тактовые импульсы с выхода, обозначенного SCK. Обмен данными происходит через выводы MISO и MOSI, соединенные взаимнообратно. Питается модуль также стабилизированными 3.3 В.

Датчик угла поворота RE при вращении своей оси выдает на выводы CLK и DT, подключенные к цифровым входам D20, D21, пару прямоугольных импульсов, смещенных друг относительно друга по фазе. По тому, какой из импульсов опережает другой, определяется направление вращения диафрагмы. Следует заметить, что датчик не определяет абсолютный угол поворота диафрагмы, и для задания начального положения ее в процессе калибровки необходимо установить сплошным сектором против объектива. Питание углового датчика (5 В) обеспечивается преобразователем MC.

Для управления прибором используются 4 кнопки S1–S4, подключенные к цифровым входам микроконтроллерной платы D13–D16 в соответствии со схемой.

Питание всего спектрометра обеспечивается батареей перезаряжаемых аккумуляторов с выходным





Puc. 6

напряжением 9 В. Параметры преобразователей напряжения, использованных на микроконтроллерной и аналоговой плате, впрочем, позволяют повышать напряжение питания до 11...12 В, в зависимости от типа используемых аккумуляторов. Прибор включается и выключается переключателем S5.

Управление спектрометром построено на выборе той или иной опции в меню нажатием соответствующей кнопки. На рис. 6 показаны связи между пунктами управляющего меню.

Измерение выполняется следующим образом. Сплошным сектором диафрагмы перекрывают входной световой поток, при этом фиксируется распределение темновых токов (шумов) по элементам фотодиодной линейки. Затем поднимают калибровочный белый экран и направляют спектрометр на Солнце (или другой источник излучения). Вращая диафрагму, выбирают положение, в котором минимальные значения яркости оказываются не меньше соответствующего темнового тока, а максимальные не выходят за верхнюю границу динамического диапазона приемника. Наконец, опустив экран и не меняя положения диафрагмы, спектрометр направляют на объект съемки и регистрируют соответствующий спектр. Результаты измерений, а также положение диафрагмы, координаты и время съемки сохраняются на SD-карте в текстовом файле, имя которого задается в соответствии с датой и временем съемок. Измерение можно прервать на любом этапе, данные в таком случае не будут сохранены.

.....

Режим просмотра данных позволяет переходить между файлами, хранящимися на SD-карте, и выводить их содержимое на экран в численном виде. При этом можно переходить между просмотром распределений темновых шумов, калибровочных спектров белого экрана и собственно спектров объекта измерения.

Меню настроек дает возможность выбирать размер серии измерений (количество спектров, регистрируемых при одном нажатии на кнопку) отдельно для темновых токов, калибровочных спектров и спектров объекта. Экран состояния GPS-приемника выводит информацию о текущем времени, координатах и количестве используемых спутников, если приемник находится в рабочем режиме, либо показывает прогресс получения данных со спутников. В меню питания задаются интервалы времени, через которые для экономии заряда батареи отключается подсветка экрана и вывод информации на него. Кроме того, программный таймер отсчитывает время, проработанное с последней зарядки батареи, сохраняя его между включениями прибора. Это необходимо для контроля разрядки батареи, поскольку литийполимерные и некоторые другие типы перезаряжаемых батарей сохраняют выдаваемое напряжение примерно на постоянном уровне почти до полной разрядки, что затрудняет их контроль по значению напряжения питания.

В соответствии с габаритами спектрометра, уменьшившимися за счет исключения из его конструкции механической части, был спроектирован

.....

новый корпус, выполненный из ABS-пластика методом трехмерной печати. Размеры корпуса вдоль главной оптической оси прибора были выбраны таким образом, чтобы не нарушить фокусировки излучения в плоскости приемника.

Для проверки юстировки модернизированного варианта спектрометра и уточнения его спектрального разрешения и рабочего диапазона была проведена его калибровка. Источником излучения послужила дуговая ртутная лампа типа ДРШ. На рис. 7 приведены графики распределения яркости в спектре ртутной лампы L_{λ} и темновых токов L_d (в произвольных единицах). Здесь и далее для построения графиков использованы медианные значения по 10 измерениям. Значения спектральной яркости далее приводятся с учетом вычитания темновых шумов.

Сопоставление линейчатого спектра излучения паров ртути [25] с ожидаемым рабочим спек-

тральным диапазоном прибора позволяет считать пики, показанные на графике, соответствующими либо первому порядку дифракции линий, лежащих в видимой области, либо второму порядку линий ближнего ультрафиолета. Для разделения порядков использовались фильтры (цветные стекла), распределения коэффициента пропускания т для которых приведены на рис. 8 [26].

Как видно из графиков, ультрафиолетовая область пропускания ультрафиолетового стекла УФС8 ограничена длиной волны 390 нм, а фиолетового стекла ФС7 – примерно 450 нм. Следовательно, с помощью одного из этих фильтров можно наблюдать линии ртутного спектра, приходящиеся на ультрафиолет, а в видимой области – их второй порядок дифракции, более слабый. Графики распределения спектральной яркости с учетом темновых токов $L_{\lambda} - L_d$, приведенные на рис. 9, *а*, иллюстрируют этот результат.



В спектре с фильтром ФС7 заметен максимум в канале 8, отсутствующий при использовании УФС8. Можно предположить соответствие ему линии 405 нм, приходящейся на промежуток между длинноволновыми границами пропускания двух фильтров. Тогда слабый максимум в канале 3 должен соответствовать линии 365 нм.

Для выделения яркой линии в зеленой области спектра (546 нм) использовалось сочетание пурпурного стекла ПС7 и желто-зеленого стекла ЖЗС5. Как видно из рис. 9, *б*, эта длина волны приходится на канал 26, в то время как в канале 57 наблюдается пик, соответствующий длине волны 794 нм. Отсутствующая в этом спектре



линия в канале 24, очевидно, относится ко второму порядку дифракции.

Наконец, желтое стекло ЖС16 (рис. 9, *в*) блокирует все излучение с длиной волны менее 460 нм. Как и в предыдущем случае, в зарегистрированном спектре присутствуют линии 546 и 794 нм, к ним добавляются линии второго порядка в каналах 49 и 59.

В качестве вывода в таблице приведены длины волн идентифицированных линий спектра ртутной лампы, сопоставленные с номерами каналов и порядком дифракции.

Номер канала	λ, нм	Порядок
3	365	1
8	405	1
12	435	1
24	265	2
26	546	1
35	615	1
49	365	2
57	794	1
59	405	2

Уравнение калибровочной прямой, соответствующей этим точкам, имеет вид $\lambda = 340 + 7.95n$, где *n* – номер канала. Таким образом, рабочая об-

1. Бузников А. А. Визуальные наблюдения дневного, сумеречного и ночного горизонтов Земли с пилотируемых космических кораблей // Космические исследования. 1972. Т. 10, вып. 1. С. 100–112.

2. Оптические явления в атмосфере по наблюдениям с пилотируемых космических кораблей / под ред. чл.-корр. АН СССР К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1972.

3. Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций / Г. Т. Береговой, А. А. Бузников, О. Б. Васильев, Б. В. Виноградов, К. Я. Кондратьев. Л.: Гидрометеоиздат, 1972.

4. Диплом на открытие № 106 / Г. Т. Береговой, А. Г. Николаев, В. И. Севастьянов, Е. В. Хрунов, К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, М. М. Мирошников, А. И. Лазарев, О. И. Смоктий. Зарег. 4 нояб. 1971 г.

5. Алексеев А. А., Шилин Б. В., Шилин И. Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 89–94.

6. Survey of current hyperspectral Earth observation applications from space and synergies with Sentinel-2 / J. Transon, R. d'Andrimont, A. Maugnard, et al. // 2017 9th Intern. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). Brugge: IEEE, 2017. P. 1–8.

7. Бузников А. А. Космическая спектрофотометрия природной среды с пилотируемых орбитальных станций // Оптический журн. 2015. Т. 82, № 7. С. 114–122. ласть спектрометра охватывает диапазон от 350 до 850 нм с разрешением не хуже 8 нм.

Модернизированный вариант спектрометра планируется применять для получения спектров растительности и водной поверхности в полевых условиях. Дальнейшее усовершенствование конструкции может включать в себя установку на входе оптической системы анализатора, т. е. врацающейся поляризационной пластинки с приводом от шагового двигателя. Возможность получать спектральные распределения яркости излучения при различных положениях плоскости поляризации повысит информативность дистанционного зондирования природных объектов [27].

Авторы статьи выражают благодарность: сотрудникам Молодежного НИИ А. Каримову и В. Рыбину за помощь в разработке программного обеспечения спектрометра; ассистенту кафедры МНЭ Н. В. Пермякову и ассистенту кафедры фотоники И. И. Михайлову – за изготовление корпуса прибора; доценту кафедры фотоники Г. А. Коноплеву и студенткам кафедры фотоники К. Антоненко и С. Политыко – за содействие в калибровке спектрометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

8. Бузников А. А. Космическая спектрофотометрия геосистем с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций // Совр. проблематика дистанционных исследований геосистем. М.: ИГ АН СССР, 1983. С. 131–143.

9. Бузников А. А. Эксперимент по затменному зондированию атмосферы в полосе 2.7 мкм H₂O с орбитальной станции «Салют–4» // Изв. ЛЭТИ. 1981. Вып. 290. С. 3–8.

10. Некоторые результаты спектрофотометрирования природных образований с пилотируемого космического корабля «Союз–9» / К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, О. Б. Васильев и др. // Космические исследования. 1972. Т. 10, вып. 2. С. 245–254.

11. Некоторые результаты спектрофотометрирования Земли с космического корабля «Союз-7» / К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, В. Н. Волков и др. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 195, № 5. С. 1084–1087.

12. Бузников А. А., Орлов В. М. Ручной спутниковый спектрограф РСС-3 для спектрометрирования Земли из космоса // Тез. докл. XI Всесоюз. совещания по актинометрии: в 7 ч. Ч. II. Приборы и методы наблюдений. Таллин: АН ЭССР, 1980.

13. Малогабаритный скоростной спектрометр MCC-2 / В. И Беляев, Л. И. Кисилевский, В. Е. Плюта и др. // Журн. прикл. спектроскопии. 1978. Т. 29, вып. 6. С. 1070–1073.

14. Зюмних К. Х. Многоканальный спектрометр МКС-М: лабораторные исследования, калибровка и проверка ее сохранности в полете // Исследования Земли из космоса. 1989. № 2. С. 71–77.

15. Кондратьев К. Я. Международная геосфернобиосферная программа (МГБП): состояние и перспективы // Изв. Всесоюзного геогр. общества. 1990. Вып. 6. С. 234–243.

16. Мишев Д. Н. Спектральные отражательные характеристики природных образований и их применение для целей дистанционного исследования Земли // Исследования Земли из космоса. 1990. № 1. С. 16–21.

17. Влияние атмосферы на альбедо при аэрокосмической съемке Земли в видимой области / К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, О. Б. Васильев и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 5. С. 471–487.

18. Литвинов А. С. Комплексный многоуровневый эксперимент «Внутренние водоемы – 86» // Биология внутренних вод. Информ. бюл. № 77. Л.: Наука, 1988. С. 3–4.

19. Use of remote and ground methods to assess the impacts of smelter emissions in the Kola peninsula / A. A. Buznikov, I. I. Payanskaya-Gvozdeva, T. K. Jurkovskaya, et al. // The Science of the Total Environment. 1995. Vol. 160–161. P. 285–293.

20. Бузников А. А., Леус В. И., Леус Н. Б. Полевой фотоэлектрический спектрометр // Изв. ГЭТУ. 1995. Вып. 481. С. 3–7.

21. Бузников А. А., Андреева А. В., Буданов А. В. Особенности спектральной аппаратуры для проведения полевых исследований растительности // Естественные и техн. науки. 2009. Т. 40, № 2. С. 298–301.

22. Связь оптических характеристик с экологическим состоянием природных вод / А. А. Тимофеев, А. А. Бузников, А. В. Андреева, А. В. Буданов, А. Л. Есипов, В. В. Панфилов // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. З, № 2. С. 155–160.

23. Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности / А. В. Андреева, А. А. Бузников, А. А. Тимофеев и др. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. З, № 2. С. 265–270.

24. Горяинов В. С., Бузников А. А., Костиков Е. В. Спектрометры для мониторинга городской растительности // СПбНТОРЭС: тр. ежегодной НТК. 2019. Т. 74. С. 264–266.

25. Strong Lines of Mercury (Hg) // NIST. URL: https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm (дата обращения 19.12.2019).

26. Каталог цветного стекла / отв. ред. В. В. Варгин. М.: Машиностроение, 1967. 62 с.

27. Бузников, А. А., Горяинов В. С., Никаноров А. Д. Поляризация излучения, отраженного природными объектами – источник информации о влажности почвы и фазе вегетации растительности // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. 2018. Вып. 5. С. 405–407.

V. S. Goryainov, A. A. Buznikov, E. V. Kostikov Saint Petersburg Electrotechnical University

REDESIGNING THE PORTABLE RSS SPECTROMETER

Passive spectral measurements play a major role in modern remote sensing of the Earth from space. The first spectral observations of the Earth's surface and atmosphere have been performed by the crews of Soviet spaceships, starting from the «Soyuz-5», and also of «Salyut-3» and «Salyut-4» orbital stations. The handheld satellite spectrometer RSS in its several consecutive modifications has been a valuable instrument for the fulfillment of these experiments. Later, using its design as a basis, a field photoelectric spectrometer was created, in which the photographic film (used in the original RSS design for a light-sensing element) was superseded by a photodiode array, and a microcontroller now controlled the device. The spectrometer's good optical design and the capabilities of microcontrollers, rapidly evolving over recent years, led the authors to the concept of RSS's modernization. The paper describes the design of a spectrometer obtained from such modernization, along with its main specifications. Some review papers on modern tendencies in space remote sensing, and a brief historical reference on the first spectral measurements from space are provided. Design features of the RSS spectrometer and its later modifications are described.

Remote sensing of the Earth, spectrometry of natural objects, portable spectrometer, spectrometer control system, Arduino-compatible microcontrollers

УДК 534.27

Я. Дурукан, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Эффекты объемных акустических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды

Целью статьи являлось изучение эффектов, возникающих при распространении объемных акустических волн (ОАВ) во вращающихся средах. Для теоретического анализа особенностей распространения ОАВ было выполнено решение уравнения движения для плоских гармонических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды распространения. Анализ результатов показал, что под действием вращения поляризация волн будет носить эллиптический характер. Отношение осей эллипса поляризации пропорционально скорости вращения среды и может быть использовано в качестве информативного параметра чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков угловой скорости (ДУС). При анализе полученного решения была выявлена аналитическая зависимость информативного параметра ЧЭ от коэффициента Пуассона материала звукопровода. Было проанализировано влияние вращения на дисперсию скорости распространяющихся ОАВ. Предложены два способа реализации конструкции макета ЧЭ. Для проведения экспериментальных исследований разработана установка и изготовлен макет ЧЭ. В результате проведения экспериментов были подтверждены ранее выдвинутые теоретические положения и оценена чувствительность макета. Полученные результаты коррелируются с ранее проведенными теоретическими исследованиями.

Ультразвуковые волны, скорость, объемные акустические волны, эллиптическая поляризация, чувствительный элемент, датчик угловой скорости

Исследование особенностей распространения в твердых средах имеет не только теоретический интерес, но и практическое применение, например при построении ЧЭ твердотельных ДУС. Изучение особенностей распространения ОАВ во вращающихся твердых средах началось в 1960-е гг. В [1], первой работе, посвященной данному вопросу, были рассмотрены особенности распространения ОАВ, создаваемых точечным источником в изотропных упругих средах, вращающихся с постоянной угловой скоростью Ω. В ней приводится уравнение движения для вращающейся среды, записанное в терминах векторного и скалярного потенциалов. В результате его решения для сферических волн не были сформулированы конкретные выводы о типах и скоростях распространяющихся волн.

В [2] были проанализированы особенности распространения ОАВ с плоским фронтом в условиях вращения. Ее авторы отмечают, что внесение в уравнение движения центростремительного и кориолисова ускорений приводит к тому, что среда становится анизотропной и диспергирующей. Ими было выдвинуто предполо-

жение о том, что фазовая скорость распространяющейся в изотропной среде ОАВ зависит от отношения угловой скорости вращения среды Ω к круговой частоте волны ω, которое характеризуется коэффициентом W. В статье также отмечается, что собственные векторы (поляризации волн) в общем случае приобретают комплексный характер, что говорит об эллиптической поляризации волн, обусловленной наличием мнимой единицы в отношении векторов поляризации волн. В случае, когда среда распространения анизотропная, собственные векторы приобретают сложный характер и выделить продольные и сдвиговые компоненты в смещениях волн невозможно. В статье тех же авторов [3] рассматривается частный случай, когда направление распространения ОАВ перпендикулярно оси вращения среды. Для этого случая были описаны типы распространяющихся волн: сдвиговая волна, а также две волны, поляризации которых уже нельзя отнести к чисто продольным и чисто сдвиговым. Стоит отметить, что несмотря на общую справедливость выдвинутых теоретических положений об усложнении характера колебаний частиц в распространяющейся

волне, в [2] и [3] также не были получены конкретные выражения, позволяющие определить скорости и поляризации волн.

Аналогичный частный случай распространения ОАВ в направлении, перпендикулярном оси вращения, рассматривался в [4], где также было высказано предположение об изменении поляризации излученной волны в условиях вращения. Автор связывал это изменение со сменой направления распространения волнового фронта, а следовательно, и волнового вектора. Данное утверждение ошибочно, так как изменение пространственной ориентации колебаний частиц в волне не связано с направлением ее распространения.

В [5] был проведен анализ как ОАВ, так и поверхностных волн Рэлея, распространяющихся во вращающейся с постоянной угловой скоростью упругой среде. Авторами статьи был сделан вывод о том, что при таких условиях ОАВ чистой линейной поляризации распространяться не могут, а фазовая скорость поверхностных волн будет зависеть от угловой скорости вращения среды.

Таким образом, в ряде рассмотренных работ, имеющих теоретический характер, различными авторами были высказаны предположения о том, что при наличии вращения распространяющиеся в упругой среде ОАВ теряют линейность поляризации. Это утверждение отчасти справедливо. Стоит отметить, что несмотря на вышесказанное, авторы либо не получили конкретных аналитических выражений, описывающих изменения характеристик ОАВ, распространяющихся во вращающихся средах, либо представленные соотношения не вполне корректны.

Изучение особенностей распространения ОАВ во вращающихся упругих средах проводилось и в области сейсмологии. В [6]–[8] оценивалось влияние вращения Земли на распространение упругих волн, имеющих сейсмическую природу.

В [6] постановка задачи совпадает с задачами из ранее рассмотренных публикаций: исследуется распространение упругих волн во вращающейся изотропной твердой среде. Автор отмечает, что характер распространения напрямую зависит от числа Кибеля (Росби) – величины, обратной *W*, которая характеризует явления геофизической природы с учетом силы Кориолиса. В статье определены типы существующих в такой среде волн: квазипродольная и квазисдвиговая диспергирующие волны. При малых значениях числа Кибеля эти волны наиболее близки к чисто продольным и чисто сдвиговым.

Влияние вращения Земли на распространение сейсмических волн анализировалось в [7], [8]. Авторы отмечают, что распространяющаяся вдоль оси вращения продольная волна не меняет своей поляризации, а сдвиговая волна представляет собой совокупность двух волн круговой поляризации, которые распространяются с различными скоростями. Это предположение подтверждается ранее проведенными исследованиями коллектива кафедры электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ) СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [9]–[12].

Исследования коллектива кафедры ЭУТ были направлены на оценку возможности применения эффектов, возникающих в условиях вращения, для создания твердотельных ЧЭ ДУС. Полученные при этом теоретические результаты позволили не только выдвинуть ряд концепций построения ЧЭ, но и экспериментально подтвердить возможность разработки твердотельных ДУС на ОАВ. Были определены типы распространяющихся волн в условиях вращения среды для двух частных случаев: когда направление распространения волны и



вращения среды совпадают (рис. 1, a) и ортогональны друг другу (рис. 1, δ).

Такой подход обусловлен тем, что в общем случае решение уравнения движения для произвольного соотношения направления распространения волны и оси вращения среды не дает удобного для анализа результата, позволяющего опрехарактеристики распространяющихся делить волн. Совокупность этих частных случаев даст описание для общего случая, когда указанные направления ориентированы произвольно по отношению друг к другу. Кроме того, решение частного случая, когда направление распространения ОАВ перпендикулярно оси вращения среды, позволит оценить устойчивость информативного параметра осевого вращения к вращению вокруг других осей.

Для первого частного случая был предложен ряд концепций и изготовлены макеты ЧЭ ДУС, испытания которых подтвердили выдвинутые в [9], [10] теоретические положения.

В данной статье рассматривается второй частный случай, для которого были определены типы распространяющихся волн, выделен информативный параметр, а также предложена концепция построения ЧЭ ДУС [11], [12].

Основные теоретические положения. Теория работы ЧЭ ДУС на ОАВ базируется на уравнении движения для вращающейся с угловой скоростью Ω среды:

$$\rho \Big[\partial^2 \xi_i / \partial t^2 + 2 \big(\epsilon_{ink} \, \Omega_n \big) \partial \xi_k / \partial t + \\ + \big(\Omega_i \Omega_k \xi_k - \Omega_k \Omega_k \xi_i \big) \Big] = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \tag{1}$$

где ρ – плотность среды; ξ_i , ξ_k – компоненты вектора смещения; t – временная координата; \in_{ink} – символ Леви–Чивита; Ω_n , Ω_i , Ω_k – компоненты вектора угловой скорости; $\sigma_{ik} = C_{iklm}u_{lm}$ – тензор механических напряжений (C_{iklm} – тензор модулей упругости материала среды распространения, $u_{lm} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_l}{\partial x_m} + \frac{\partial \xi_m}{\partial x_l} \right)$ – тензор деформации x_m, x_l, x_k – пространственные координаты, индексы *i*, *k*, *l*, *m* могут принимать значения 1, 2, 3).

Решение уравнения движения может проводиться для различных типов волн и материалов среды распространения. Оно будет выполнено для плоских гармонических волн (ПГВ), которые представляются в виде

$$\xi_i = \xi_{0i} \exp\left[j\left(\omega t - k_m x_m\right)\right]$$

где ξ_{0i} – амплитуда смещения частиц в волне; j – мнимая единица; ω – круговая частота колебаний; k_m – компоненты волнового вектора.

В качестве среды распространения могут использоваться как изотропные твердые среды, так и кристаллы различных видов симметрии. Класс рассматриваемых материалов будет ограничен изотропными средами. При этом полученное решение будет справедливо для распространения ОАВ вдоль кристаллографической оси, например оси X_1 кристалла кубической симметрии. Для этого случая при распространении ПГВ вдоль оси X_1 из уравнения (1) получается система уравнений

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} C_{11} - \rho v^{2} (1 + W_{2}^{2} + W_{3}^{2}) \end{bmatrix} \xi_{01} - (2jW_{3} - W_{1}W_{2}) \times \\ \times \rho v^{2} \xi_{02} + (2jW_{2} - W_{1}W_{3})\rho v^{2} \xi_{03} = 0; \\ \begin{bmatrix} C_{44} - \rho v^{2} (1 + W_{1}^{2} + W_{3}^{2}) \end{bmatrix} \xi_{02} + (2jW_{3} - W_{1}W_{2}) \times \\ \times \rho v^{2} \xi_{01} - (2jW_{1} - W_{2}W_{3})\rho v^{2} \xi_{03} = 0; \\ \begin{bmatrix} C_{44} - \rho v^{2} (1 + W_{1}^{2} + W_{2}^{2}) \end{bmatrix} \xi_{03} - (2jW_{2} - W_{1}W_{3}) \times \\ \times \rho v^{2} \xi_{01} + (2jW_{1} - W_{2}W_{3})\rho v^{2} \xi_{02} = 0, \end{cases}$$

$$(2)$$

где $v - \phi$ азовая скорость распространяющейся волны; $W_i = \Omega_i / \omega$ – относительная скорость вращения; запись модулей упругости выполнена в матричной форме. Система (2) позволяет определить характеристики волн (скорости распространения и тип поляризации) в условиях вращения среды для распространения ОАВ вдоль кристаллографических осей кубических кристаллов и для изотропной среды ($C_{11} = \lambda + 2\mu$, $C_{44} = \mu$, где λ и μ – постоянные Ламе).

Распространение волн вдоль оси X_1 в случае, когда вращение среды происходит вокруг перпендикулярной оси X_2 или X_3 : $\Omega \equiv \Omega_2 \neq 0$ ($\Omega_1 = \Omega_3 = 0$) или $W \equiv W_2 \neq 0$ ($W_1 = W_3 = 0$), было рассмотрено авторами данной статьи в [10]. Система (2) примет следующий вид, если ПГВ распространяется вдоль кристаллографической оси X_1 кристалла кубической симметрии при вращении вокруг оси X_2 :

$$(C_{44} - \rho v^2)\xi_{02} = 0; \tag{3}$$

$$\begin{cases} \left[C_{11} - \rho v^2 \left(1 + W^2 \right) \right] \xi_{01} + 2j\rho v^2 W \xi_{03} = 0; \\ \left[C_{44} - \rho v^2 \left(1 + W^2 \right) \right] \xi_{03} - 2j\rho v^2 W \xi_{01} = 0. \end{cases}$$
(4)

Уравнение (3) описывает распространение сдвиговой волны с вектором смещения ξ_{02} , отличным от нуля и сонаправленным с осью вращения X_2 . На характеристики этой волны вращение не оказывает влияния, а ее скорость v_t соответствует скорости сдвиговых волн в среде при отсутствии вращения.

Система (4) описывает волны, характеристики которых зависят от относительной скорости вращения W.

Для определения скоростей и поляризаций этих волн система (4) может быть переписана с учетом того, что $\xi_{01} = \xi_0 p_i$, где p_i – направляющие косинусы вектора смещения:

$$\begin{cases} \left(C_{11} - \rho v^2 - \rho v^2 W^2\right) p_1 + j 2\rho v^2 W p_3 = 0; \\ -j 2\rho v^2 W p_1 + \left(C_{44} - \rho v^2 - \rho v^2 W^2\right) p_3 = 0. \end{cases}$$
(5)

Система (5) позволяет определить значения скоростей распространения и направления вектора поляризации колебаний частиц в волне. Фазовые скорости *v* находятся из условия равенства нулю определителя системы:

$$\begin{bmatrix} C_{11} - \rho v^2 (1 + W^2) \end{bmatrix} j 2\rho v^2 W - j 2\rho v^2 W \begin{bmatrix} C_{44} - \rho v^2 (1 + W^2) \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

откуда

(8), соответствует отношению осей эллипса (рис. 2).
Поскольку в этом случае траектория движений ча-
стиц среды не совпадает ни с осью распростране-
ния, ни с осью, перпендикулярной ей, то в даль-
нейшем такие волны будем называть квазисдвиго-
выми (
$$v_2 = v_{qt}$$
, рис. 2, *a*) и квазипродольными ($v_1 = v_{qt}$, рис. 2, *б*).



Выражения (7), (8) не позволяют аналитически найти функциональные зависимости параметров волн от W, поэтому дальнейший анализ удобно проводить численными методами для конкретного материала звукопровода. В качестве материала звукопровода можно использовать любые изотропные материалы и кристаллы с кубической симметрией. Для численного анализа был выбран плавленый кварц, так как это изотропный материал, имеющий широкое применение в подобных устройствах. Плавленый кварц имеет следующие параметры: плотность $\rho = 2.2 \cdot 10^3$ кг/м³,

$$\gamma_{1,2} = \sqrt{\frac{(C_{11} + C_{44})(W^2 + 1) \pm \sqrt{(C_{11} + C_{44})^2 (W^2 + 1)^2 - 4(W^2 - 1)^2 C_{11}C_{44}}}{2\rho (W^2 - 1)^2}},$$
(7)

где v_1 , v_2 – скорости двух волн, удовлетворяющих (6).

Отношение компонент вектора поляризации можно определить, подставив найденные значения скоростей v_1 , v_2 в систему (5):

$$\left(\frac{p_1}{p_3}\right)_{1,2} = -j \frac{2\rho W v_{1,2}^2}{C_{11} - \rho v_{1,2}^2 \left(1 + W^2\right)}.$$
 (8)

Как видно из (7), (8), скорости распространения и характер движения частиц в волне зависят от относительной скорости вращения звукопровода. Мнимая единица в (8) соответствует фазовому сдвигу между компонентами вектора поляризации на $\pi/2$ по соответствующим осям. Таким образом, колебания частиц в таких волнах будут носить эллиптический характер. Величина, определяемая

 $C_{11} = 78.15 \cdot 10^9$ н/м², $C_{44} = 31.1 \cdot 10^9$ н/м². Анализ характеристик волн проводился с использованием математического пакета MathCAD.

Зависимость относительного изменения скоростей распространения квазипродольной и квазисдвиговой волн от относительной скорости вращения звукопровода *W* имеет квадратичный характер. Таким образом, использование изменения скорости распространения ОАВ в качестве информативного параметра делает датчик не чувствительным к вращению.

Информативный параметр ЧЭ ДУС. Зависимость отношения длин осей эллипсов поляризации для квазипродольной $(P_{ql} = (p_3/p_1)_{ql}$ – прямая *I*), и квазисдвиговой $(P_{qt} = (p_1/p_3)_{qt}$ –



прямая 2) волн от относительной скорости вращения звукопровода, выполненного из плавленого кварца, представлена на рис. 3.

Как видно из рисунка, эта зависимость носит линейный характер и, следовательно, величины P_{ql} и P_{qt} , отнесенные к W, имеют постоянные значения. Таким образом, величина, равная отношению осей эллипса поляризации распространяющихся волн, может служить информативным параметром для построения ЧЭ ДУС, ось чувствительности которых ортогональна направлению распространения волны.

Влияние среды распространения на уровень информативного параметра. В табл. 1 представлены расчеты P_{ql}/W и P_{qt}/W для различных материалов. Как видно из таблицы, при заданной относительной частоте вращения W соотношение длин осей эллипса зависит от коэффициента Пуассона. Можно заметить, что с увеличением коэффициента Пуассона они уменьшаются.

Материал	ν	ρ, кг/м ³	P_{ql}/W	P_{qt}/W
Кварц плавленый	0.17	$2.2 \cdot 10^3$	3.322	1.322
Стекло Ф1	0.22	$3.57 \cdot 10^3$	3.139	1.139
Стекло флинт	0.30	$4.76 \cdot 10^3$	2.795	0.795
Висмут	0.33	9.80·10 ³	2.667	0.667
Алюминий	0.36	$2.70 \cdot 10^3$	2.578	0.578
Оргстекло	0.40	$1.15 \cdot 10^3$	2.398	0.398

Таблица 1

На рис. 4 зависимость отношения длин осей эллипса от коэффициента Пуассона представлена графически. При этом введены следующие обозначения: $P_1 = P_{al}/W$ (линия *l*), $P_2 = P_{at}/W$ (линия *2*).



Рассчитанные зависимости могут быть аппроксимированы следующими функциями:

$$P_{ql}/W = vn_1 + b_1;$$

$$P_{qt}/W = vn_2 + b_2.$$
(9)

Найденные значения $n_1 = n_2 = -4.023$ и $b_1 = 4.002$, $b_2 = 2.002$ позволяют определить характер движения частиц среды в зависимости от скорости вращения для любого материала по известному коэффициенту Пуассона v.

Выражения (9) можно получить аналитически исходя из известных соотношений для модулей упругости, записанных для пары упругих констант λ и v:

$$C_{11} = \frac{\lambda(1-\nu)}{\nu}; \ C_{44} = \frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}.$$
 (10)

Числитель и знаменатель выражения (8) можно разделить на произведение $\rho v_{1,2}^2$:

$$\left(\frac{p_1}{p_3}\right)_{1,2} = -j\frac{2W}{C_{11}/\rho v_{1,2}^2 - (1+W^2)}.$$
 (11)

Видно, что упругие свойства среды учитываются только в первом слагаемом знаменателя (11). В связи с этим целесообразно рассмотреть это слагаемое отдельно, сначала для фазовой скорости v₁ с учетом (7).

Таким образом, влияние упругих свойств среды определяется отношением модулей упругости C_{44}/C_{11} , которое можно преобразовать с учетом (10):

$$\begin{aligned} & \frac{C_{11}}{\rho v_1^2} = \frac{1}{\rho} \frac{C_{11}}{(C_{11} + C_{44})} \frac{2(W^2 - 1)}{(W^2 + 1) + \sqrt{(C_{11} + C_{44})^2 (W^2 + 1)^2 - 4(W^2 - 1)^2 C_{11}C_{44}}} \\ & = \frac{1}{\rho} \frac{2(W^2 - 1)}{(1 + C_{44}/C_{11})(W^2 + 1) + \sqrt{(1 + C_{44}/C_{11})^2 (W^2 + 1)^2 - 4(W^2 - 1)^2 C_{44}/C_{11}}}; \end{aligned}$$

Физика

$$\frac{C_{44}}{C_{11}} = \frac{(1-2\nu)}{2\nu} \frac{\nu}{(1-\nu)} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} = G$$

Тогда, выражение для отношения осей эллипса поляризации примет вид

$$\left(\frac{p_1}{p_3}\right)_{1,2} = -j2W / \left[\frac{1}{\rho} \frac{2(W^2 - 1)}{(1+G)(W^2 + 1) + \sqrt{(1+G)^2(W^2 + 1)^2 - 4(W^2 - 1)^2 G}} - (1+W^2)\right].$$

Дисперсия во распространения. Утверждение о том, что среда, в которой распространяются волны, становится диспергирующей при наличии вращения, справедливо не для всех соотношений направлений распространения волны и вращения среды. Дисперсия отсутствует, если ось вращения совпадает с направлением распространения волны, так как скорость распространения сдвиговой волны, представляющей собой суперпозицию двух волн круговой поляризации, не зависит от частоты ультразвуковой волны [10].

Для случая, когда направление распространения волны перпендикулярно оси вращения среды, относительное изменение скорости распространения волны пропорционально W². Зависимость величины относительного изменения скорости распространения ОАВ $\Delta v/v$ для квазипродольной и квазисдвиговой волн от частоты вращения среды Ω и частоты fколебаний ультразвука представлена в табл. 2.

			,	
	<i>f</i> , МГц			
		$(\Delta v/v) \cdot 1$.0-9	
Ω,об/с	0.1	0.5	1	
0.5	0.0375	0.0015	0.000375	
1	0.15	0.006	0.015	
2	0.6	0.024	0.006.	
5	3.75	0.156	0.0375	

Таблица 2

Как видно из таблицы, относительное изменение скорости волны в ультразвуковом диапазоне частот при скорости вращения среды от 0.5 до 5 об/с лежит в пределах от 0.000375 · 10⁻⁹ до 3.75 · 10⁻⁹. Такой малый порядок величины не окажет влияния на работу ЧЭ ДУС на ОАВ, где информативным параметром является величина появляющейся ортогональной компоненты вектора поляризации в излученной линейно-поляризованной волне.

Влияние вращения, ось которого перпендикулярна направлению распространения ОАВ, на траекторию движения частиц в волне, распространяющейся сонаправленно с осью вращения

среды. На информативный сигнал ЧЭ, который работает на принципах выявления поворота вектора поляризации в излученной сдвиговой волне, когда направление распространения волны совпадает с осью вращения среды, влияет ряд факто-

$$= -j2W / \left[\frac{1}{\rho} \frac{2(W^2 - 1)}{(1 + G)(W^2 + 1) + \sqrt{(1 + G)^2(W^2 + 1)^2 - 4(W^2 - 1)^2 G}} - (1 + W^2) \right].$$

одн в условиях вращения сред ров – например, наличие дополнительно

ого вращения, происходящего перпендикулярно направлению распространения ОАВ. Такая ситуация наблюдается, когда ось вращения не совпадает с направлением распространения ОАВ. Чтобы оценить погрешность, вносимую в информативный сигнал, необходимо определить изменение амплитуды излучаемой сдвиговой составляющей квазисдвиговой волны. Как было отмечено ранее, излученная сдвиговая волна (рис. 5, а) под влиянием дополнительного вращения раскладывается на две волны эллиптической поляризации: квазисдвиговую (рис. 5, б) и квазипродольную (рис. 5, в).



Пусть значение вектора поляризации излученной сдвиговой волны равно 1. В условиях вращения происходит перераспределение излученного смещения: у - сдвиговая компонента в квазисдвиговой волне эллиптической поляризации и z сдвиговая компонента в квазипродольной волне эллиптической поляризации. Соответственно, значение вектора поляризации в изначально возбужденной сдвиговой волне уменьшилось на z, которую необходимо определить. Это можно сделать исходя из определенных ранее выражений для отношения длин эллипсов поляризации (8) с учетом того, что значение вектора смещения в излученной волне равно 1:

$$\begin{cases} z + y = 1; \\ \frac{y}{x} = P_{qt}W \\ \frac{x}{z} = P_{ql}W; \end{cases} \begin{cases} z + y = 1; \\ y = P_{qt}Wx \Longrightarrow \\ x = P_{ql}Wz; \\ z = \frac{1}{1 + P_{ql}P_{qt}W^2}. \end{cases}$$

Таким образом, при наличии вращения вокруг оси, ортогональной направлению распространения ОАВ, значение сдвиговой компоненты уменьшается на *z*. Это уменьшение зависит от квадрата относительной скорости вращения. Ввиду того, что это – величина второго порядка малости, ею можно пренебречь. Отсюда следует, что ЧЭ ДУС, построенный на принципе выявления поворота вектора поляризации, может быть с высокой степенью точности одноосевым.

Концепция построения макета ЧЭ ДУС. Распространяющееся в среде смещение будет представлять собой суперпозицию смещений в квазипродольной и квазисдивговой волнах эллиптической поляризации, которые распространяются с разной фазовой скоростью. В результате интерференции этих волн на некоторых расстояниях от излучателя колебания частиц, происходящие в ортогональном направлении относительно колебаний в излученной волне, достигают максимального значения. По найденным выражениям для скоростей распространения волн (7) и соотношениям векторов смещений этих волн (8) можно оценить информативный параметр сигнала. Под информативным параметром понимается перпендикулярная компонента вектора смещения, которая появляется в условиях вращения. Можно показать, что она возникнет и в случае возбуждения чисто сдвиговой волны по мере ее распространения.

Для ЧЭ, построенных на указанном принципе, необходимо рассчитать расстояние, на котором наблюдается максимум возникающей ортогональной компоненты вектора поляризации распространяющейся волны. Оно определяется из условия кратности разности фаз двух базовых волн 2π [12]:

$$k_1 x - k_2 x + \varphi = 2\pi n;$$

$$x_n = \frac{(n - 0.5)Tv_1 v_2}{v_2 - v_1}.$$

Например, для плавленого кварца ($v_1 = 3.76 \cdot 10^3$ м/с, $v_2 = 5.96 \cdot 10^3$ м/с) расстояние

появления первого максимума (n = 1) на частоте f = 0.5 МГц будет равно $x_1 = 10.2$ мм. Следующий максимум будет наблюдаться на расстоянии 30.6 мм, и т. д. Тогда, если поместить приемник продольной компоненты вектора смещения на указанном расстоянии от излучателя чисто сдвиговой волны, то при непрерывном режиме работе излучателя можно судить о вращении тела по продольной компоненте. Траектория движения частиц в суммарной линейно поляризованной поперечной волне представлена на рис. 6.



При использовании импульсного режима (рис. 7, a) на некотором расстоянии от излучателя И базовые волны эллиптической поляризации разбегутся, перестанут взаимодействовать друг с другом и станут распространяться раздельно. Расстояние, на котором волны прекратят совместное распространение, можно определить при известной длительности импульса т_и. На расстоянии разбега x_p в момент времени t₁ сначала появится импульс от квазипродольной волны (рис. 7, б), так как скорость ее распространения больше, чем скорость квазисдвиговой. Через некоторое время, в момент t2, в этой же точке окажется импульс от более медленной - квазисдвиговой волны (рис. 7, в). Волны перестанут взаимодействовать, когда начало импульса медленной волны придет в точку наблюдения с опозданием минимум на ти по отношению к концу импульса быстрой волны. Тогда, если разместить приемник П продольной волны на расстоянии больше указанного, то он будет принимать два одинаковых сигнала - продольные компоненты вектора смещения сначала от квазипродольной, а затем от квазипоперечной волн.

Условие раздельного распространения базовых волн заключается в задержке импульса от квазипродольной волны на время длительности импульса:

$$\frac{x_p}{v_1} = \tau_{\rm H} + \frac{x_p}{v_2}, \ x_p = \tau_{\rm H} \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1}.$$

.....



Для ранее рассмотренного примера материала звукопровода (плавленый кварц) при длительности импульса $\tau_{\mu} = 1$ мкс сигнал будет приниматься раздельно на расстояниях не менее 10 мм.

Экспериментальные исследования. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 8. Генератор радиоимпульса ГРИ АКИП 3402 возбуждает гармонические колебания с амплитудой 4 В на частоте 0.5 кГц, которые затем подаются на усилитель мощности УМ, имеющий свой блок питания БП. Усиленные до амплитуды 200 В колебания подаются на измерительный стенд ИС, который представляет собой стенд одноосный автоматизированный (СОА-15.5) [13] с размещенным на нем макетом чувствительного элемента датчика угловой скорости (рис. 8). ИС управляется при помощи персонального компьютера ПК через блок управления БУ соответствующим программным обеспечением. Информативный сигнал снимается при помощи встроенного в ИС разъема и разработанной системы съема сигнала с макета ЧЭ (рис. 9). Принятый ИС сигнал подается на осциллограф LeCroy Wave Surfer 24 Xs.





На рис. 10 показана схема измерительного стенда, представляющего собой COA15.5, обозначенный выноской *I*, и размещенный на нем макет ЧЭ. Съем информативного сигнала обеспечивался через разъем *2* типа DB 9.

.....



Выходное напряжение макета ЧЭ ДУС определяется следующим соотношением [14]:

$$U_{\rm BMX} = U_{\rm BX} K_{\rm aK} K_{\Gamma} \Omega$$

где $U_{\rm BX}$ – напряжение на выходе ЧЭ; $K_{\rm ak}$ – коэффициент передачи акустического тракта ЧЭ; K_{Γ} – коэффициент передачи гироскопической составляющей (P_{al}/W).

Для разработанного макета $U_{\rm BX} = 200$ В, $K_{\rm a\kappa} = -8$ дБ, $K_{\Gamma} = (3.3/2\pi)W = 4.23 \cdot 10^{-6}$. Коэффициент передачи акустического тракта $K_{\rm a\kappa}$ был рассчитан по методике, подробно изложенной в [14]. Параметры излучающего (ИП) и приемного (ПП) преобразователей представлены в табл. 3.

Параметр	ИП	ПП
Поляризация	Сдвиговая	Продольная
Материал	ЦТС-19	ЦТС-19
Форма	Круглая	Круглая
Диаметр, мм	20.0	35.0
Толщина, мм	1.76	3.7
Резонансная частота, МГц	0.5	0.5

Таблица 3

Таблииа 4

Звукопровод длиной 70 мм был выполнен из плавленого кварца, а в качестве материала контактного слоя использовался салол. При расчетах учитывалось нагрузка приемной пьезопластины на шунтирующее сопротивление 50 Ом. Результаты зависимости выходного напряжения $U_{вых}$ от угловой скорости вращения Ω , рассчитанные теоретически и полученные при проведении эксперимента, представлены в табл. 4.

0 05/0	$U_{ m bbix}$, мкВ		
52, 00/C	Эксперимент	Теория	
-4	-300	-334	
-3	-215	-250	
-2	-150	-166	
-1	-90	-84	
0	0	0	
1	88	84	
2	160	166	
3	230	250	
4	300	334	

Как видно из таблицы, полученные значения выходного напряжения при проведении эксперимента совпадают с расчетными значениями в пределах погрешности проводимых измерений. Стоит отметить, что данный макет ЧЭ имеет большие габариты, что не позволяет использовать его в изделиях, где критичны требования к размерам измерительной аппаратуры. Уменьшение габаритов макета ЧЭ для данной концепции построения не может быть выполнено, поскольку повлечет за собой увеличение рабочей частоты ультразвука, что пропорционально снизит уровень информативного сигнала. Это обусловлено обратно пропорциональной зависимостью коэффициента гироскопической составляющей от частоты ультразвука f. В связи с этим применение данного способа измерения угловой скорости возможно не в качестве ЧЭ ДУС, а непосредственно при размещении на конструктивных деталях объекта. Для устройств, отвечающих тенденциям миниатюризации, наиболее перспективны ЧЭ ДУС, построенные на принципе выявления поворота вектора поляризации в излученной сонаправлено с осью вращения среды сдвиговой волне. Так, для выявления вращения, происходящего под произвольным углом по отношению к направлению распространения ОАВ, могут применяться три таких ЧЭ или один, позволяющий разместить три пары преобразователей на взаимно ортогональных плоскостях.

Таким образом, при исследовании особенностей распространения ОАВ перпендикулярно оси вращения среды можно сделать следующие выводы:

 В качестве информативного параметра целесообразно использовать уровень возникающей компоненты вектора поляризации в излученной линейно поляризованной волне.

2. Информативный параметр имеет однозначную зависимость от коэффициента Пуассона материала среды распространения ОАВ. Чем больше значение v, тем меньше уровень информативного сигнала.

3. Дисперсия фазовой скорости распространения ОАВ не наблюдается в случае, когда волна распространяется в направлении, совпадающем с осью вращения среды, а также когда ОАВ распространяется перпендикулярно оси вращения среды с вектором смещения, совпадающим с осью вращения среды. В остальных случаях наблюдается дисперсия фазовой скорости.

4. ЧЭ ДУС, построенный на принципах выявления поворота вектора поляризации излученной сдвиговой волны, одноосевой, поскольку влияние вращения, ось которого перпендикулярна направлению распространения ОАВ, представляет собой величину второго порядка малости, которую можно не учитывать при определении угловой скорости.

5. Выдвинутые теоретические положения, а также предложенная концепция построения макета ЧЭ справедливы. Результаты проведенных экспериментальных исследований продемонстрировали линейный характер зависимости информативного параметра от угловой скорости вращения среды. 6. Полученный при экспериментальных исследованиях уровень информативного сигнала в достаточной степени коррелируется с ранее определенным теоретическим уровнем чувствительности предложенного макета ЧЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Subba Rao V., Nigam S. D. Wave propagation in rotating elastic media // Mathematica. 1964. No 11. P. 29–38.

2. Schoenberg M., Censor D. Elastic waves in rotating media // Quart. Appl. Math. 1973. № 31. P. 115–125.

3. Schoenberg M., Censor D. Two dimensional wave problems in rotating elastic media // Appl. Sci. Res. 1973. № 27. P. 401–414.

4. Hamisch H. Die Ausbreitung elastischer Wellen im rotierenden Medium // Acustica. 1990. Vol. 72, № 4. S. 275–279.

5. Ерофеев В. И., Клюева Н. В., Солдатов И. Н. Распространение волн во вращающемся упругом полупространстве // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. № 1. С. 39-47.

6. Auriault J.-L. Body wave propagation in rotating elastic medium // Mechanics Research Communications. 2004. № 31. P. 21–27.

7. Seismic shear waves as a Foucault pendulum / R. Snieder, C. Sens-Schonfelder, E. Ruigrok, K. Shiomi // Geophysical Res. Lett. 2016. № 43. P. 2576–2581.

8. Snieder R., Sens-Schonfelder C., Ruigrok E. Elasticwave propagation and the Coriolis force // Physics Today. 2016. Vol. 69, № 12. P. 90–91.

9. Gribkova E., Peregudov A., Shevelko M. Theoretical and experimental researches of bulk acoustic

Ya. Durukan, A. N. Peregudov, M. M. Shevelko Saint Petersburg Electrotechnical University

EFFECTS OF BULK ACOUSTIC WAVES PROPAGATING ORTHOGONAL TO THE ROTATION AXIS OF THE MEDIUM

The aim of this work was to study the effects that occur during the propagation of bulk acoustic waves (BAW) in rotating media. To theoretically analyze the features of the propagation of BAW, a solution of the equation of motion was performed for plane harmonic waves propagating orthogonal to the axis of rotation of the propagation medium. An analysis of the results of the solution showed that under the action of rotation, the polarization of the waves will be elliptical. The ratio of the axes of the polarization ellipse is proportional to the speed of rotation of the medium and can be used as an informative parameter of the sensitive elements (SE) angular velocity sensors (AVS). When analyzing the obtained solution, an analytical dependence of the informative SE parameter on the Poisson's ratio of the sound duct material was revealed. The effect of rotation on the dispersion of the velocity of propagating BAW was analyzed. Two methods have been proposed for implementing the design of the layout of the SE. To conduct experimental research, an installation was developed and a model of the SE was made. As a result of the experiments, previously advanced theoretical positions were confirmed and the sensitivity of the layout was evaluated. The results obtained are correlated with previous theoretical studies.

Ultrasonic waves, velocity, bulk acoustic waves, elliptical polarization, sensing element, angular velocity sensor

wave's availability in angular motion sensors // Proc. of the IEEE Russia. 2011. № 1. P. 69–72.

10. Solid-state motion sensors on acoustic waves / E. Gribkova, A. Kukaev, D. Lukyanov, A. Lutovinov, A. Peregudov // Theory and experiment. 2014 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, St. Petersburg, 2014. P. 69–71.

11. К вопросу о характеристиках волн, распространяющихся во вращающейся среде / Я. Дурукан, А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 57–61.

12. О возможности построения датчиков вращательного движения на объемных акустических волнах / Я. Дурукан, А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 10. С. 69–73.

13. ООО «Инертех». URL: http://inertech-ltd.com/% d1%81%d0%be%d0%b0-15-5 (дата обращения 23.10.2019).

14. Дурукан Я., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Анализ коэффициента передачи акустического тракта датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 1. С. 56–65.

УДК 681.883.2.024

К. Е. Аббакумов, И. С. Бобриков, А. В. Вагин Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование приемного тракта гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре

Рассмотрен вопрос формирования характеристики направленности в тракте приема гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре. Определена интенсивность сигнала с учетом влияния среды на его распространение. Проанализированы основные параметры среды и сигнала, влияющие на интенсивность. Построена характеристика направленности гибкой протяженной буксируемой антенны для различных углов компенсации. Введен учет направленных свойств антенны посредством умножения характеристики направленности на интенсивность сигнала. Произведено энергетическое суммирование по всему частотному диапазону работы антенны. Определены классификационные признаки: акустическая протяженность и асимметрия сигнала, на основе которых будет вынесено решение о том, от какого объекта пришел сигнал: группового или одиночного. Рассчитаны для разных значений углового положения акустическая протяженность и асимметрия сигнала и двумя методами: методом

Характеристика направленности, модель сигнала, протяженная антенна, круговой обзор, интенсивность сигнала, коэффициент концентрации

Гибкие протяженные буксируемые антенны (ГПБА) применяются для обеспечения поддержания требуемой эффективности гидроакустических комплексов (ГАК) и станций в таких сигнально-помеховых и гидролого-акустических условиях, когда возможности антенн, установленных на корпусе надводного корабля, существенно снижаются.

Основное назначение гидроакустических станций (ГАС) с ГПБА – прием и пеленгование шумовых сигналов низких звуковых частот, в том числе дискретных составляющих в спектре шумоизлучения корабля. К основным структурным элементам системы с ГПБА относятся протяженная буксируемая антенна, устройство хранения, постановки и выборки антенны (УХПВ), устройства обработки принятых сигналов и отображения информации [1].

Помехи работе ГАС с ГПБА могут быть разделены на собственные и внешние. К собственным относятся следующие помехи: гидродинамические, которые возникают из-за пульсаций давления в потоке обтекания; вибрационные – изза буксировки антенны и воздействия на гидрофоны через механические связи; обусловленные механическими деформациями антенны и т. д. Внешние помехи формируются с учетом фонового шума моря; корабельной помехи; помехи из-за движения ГПБА в кильватерном следе корабля-буксировщика и др.

Система буксировки антенны включает в себя кабель-буксир и заглубитель. Она должна обеспечить вывод ГПБА на заданную глубину при требуемом удалении от корабля-буксировщика и последующую стабильность пространственного положения антенны во время работы. Возможны две схемы буксировки: с использованием длинного «тяжелого» или короткого «легкого» кабель-буксира, снабженного гидродинамическим заглубителем.

Кабель-буксир выполняет важнейшую функцию – пространственное разнесение ГПБА и корабля-буксировщика как источника интенсивных помех ее работе. Кабель-буксир соединяет ГПБА либо с заглубляющим устройством, либо непосредственно с подводной лодкой (ПЛ) [1].

Использование буксируемых антенн по отношению к антеннам, устанавливаемым на корпусе корабля, дает следующие преимущества:

 – обеспечиваются наилучшие условия для обнаружения целей, в том числе находящихся ниже слоя скачка скорости звука; – уменьшается уровень помех от собственного корабля-носителя; минимизируется дестабилизирующее влияние качки корабля;

 возможность заглубления антенны на ось подводного звукового канала (ПЗК), что резко увеличивает дальность действия ГАК.

Несмотря на приведенные преимущества использования буксируемых антенн при их эксплуатации необходимо учитывать погодные условия, так как штормовое состояние моря может просто наложить запрет на использование ГПБА. Также имеется сложность в управлении положением буксируемой антенны, связанная с необходимостью учета его вертикальных перемещений в толще воды, особенно при изменении курса или скорости корабля-носителя.

К основным требованиям, которым должна удовлетворять ГПБА, относятся [1]:

 – формирование в рабочем диапазоне частот требуемой характеристики направленности (ХН), обеспечивающей необходимую разрешающую способность ГАС по пространству;

 – минимальные искажения при передаче сигналов от гидрофонов к бортовой аппаратуре;

- плавучесть, близкая к нейтральной;

- ремонтопригодность.

Целью статьи является изучение параметров сигнала, принимаемого на гибкую протяженную буксируемую антенну. К таким параметрам относится акустическая протяженность и асимметрия сигнала, рассчитанная двумя методами. С помощью определения пороговых уровней данных величин выносится решение о приеме сигнала от группового или одиночного объекта.

Актуальность данной темы обусловлена тем фактом, что использование гибкой протяженной буксируемой антенны для пеленгования целей обеспечивает оптимальные условия для их обнаружения, в том числе для целей, находящихся ниже слоя скачка скорости звука. Тем самым возникает необходимость рассмотрения наиболее применимых классификационных признаков, используемых при работе ГПБА. Также важным фактором, который влияет на все большее использование ГПБА – это существенное уменьшение влияния собственных помех корабля-носителя и минимизация дестабилизирующего влияния качки корабля.

Рассмотрим приемный тракт гибкой протяженной буксируемой антенны. Пусть на антенну ГПБА поступает сигнал от объекта. Расчет сигнала, пришедшего на ГПБА от предполагаемой це-

ли, выполняется начиная с вычисления интенсивности сигнала относительно среды, в которой происходит распространение. Интенсивность в точке расположения цели на расстоянии *r* от источника (без учета отражений от дна и поверхности моря) определяется по формуле [2]:

$$I_{i,j} = \frac{P_0 \sqrt{\Delta f}}{f_i^{\alpha_f} D_i} \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{\alpha_{\nu}} \sqrt{A_i} 10^{-0.05 D_j \beta_i}, \qquad (1)$$

где *i* – номер отсчета по частоте; *j* – номер объекта; P_0 – приведенный уровень шумности; Δf – излучаемая полоса частот; f_i – частотные отсчеты; α_f – частотный спектр; D_i – расстояние до объекта; v, v_0 – скорости буксировки и приведения; α_v – показатель степени приведения; A_j – фактор аномалии для *j*-го луча, приходящего в точку наблюдения; β_i – коэффициент затухания среды.

Исходя из предположения, что на антенну может приходить не один сигнал, а несколько, в формуле (1) вводится дополнительный индекс j – номер объекта, находящегося на дистанции D_j .

Коэффициент затухания морской среды β_i , отражающий потерю акустической энергии, вычисляется по следующей формуле [2]:

$$\beta_i = \frac{a + b f_i^c}{1000},$$

где *a*, *b*, *c* – коэффициенты, отражающие специфику (например, структуру мелкого моря) той или иной области морской акватории, в которой происходит поиск объекта.

В представленной математической модели коэффициент затухания среды β_i частотно зависим и показывает закон изменения звукового поля с расстоянием.

Под фактором аномалии A_j понимается отношение интенсивности акустического поля рефрагирующей среды в точке, удаленной на расстояние r от источника, к интенсивности звука в однородной безграничной среде на том же расстоянии r от источника [3].

Следует отметить, что ГПБА работает в диапазоне низких частот. Выбор низкочастотного диапазона обусловлен отсутствием добавочных максимумов у характеристики направленности, затрудняющих принятие решения о направлении прихода полезного сигнала от цели и повышающих вероятность ложной тревоги, а также требованием максимизации дальности действия. Дискретные отсчеты частоты можно представить в виде следующего выражения:

$$f_i = f_0 + i\Delta f_i$$

где f_0 – текущая частота из диапазона; Δf – шаг по частоте.

После прихода сигнала на гибкую протяженную буксируемую антенну необходимо учесть направленные свойства антенны в виде ее характеристики направленности как отношение звукового давления, создаваемого антенной в дальнем поле излучателя в произвольном направлении, к давлению, создаваемому антенной в фиксированном направлении на одинаковом расстоянии от антенны.

Характеристика направленности ГПБА соответствует характеристике направленности линейной дискретной эквидистантной антенне с заданным распределением углов компенсации θ_k . Положение пространственных каналов определим как положение оси главного максимума XH на определенных углах компенсации $\theta_k(n)$.

Соответствующие углы компенсации определяются по следующей формуле:

$$\theta_k(n) = \frac{180}{\pi} \arcsin\left\{\frac{[n-(N+1)/2]}{[(N-1)/2]}\right\},$$

где номер пространственного канала n = 1, ..., N, N = 81 – количество пространственных каналов.

Заданием угла компенсации формируется направление главного максимума характеристики направленности на этот угол и происходит сканирование требуемой области пространства в определенном угловом диапазоне без физического поворота самой антенны. При сканировании области пространства формируется веер характеристик направленности для различных направлений [4].

Характеристика направленности эквидистантной линейной решетки вычисляется по следующей формуле [4]:

$$R(\theta, \theta_k) = \frac{\sin\left[nZ(\theta, \theta_k)\right]}{n\sin\left[Z(\theta, \theta_k)\right]},$$
(2)

где $Z(\theta, \theta_k) = \frac{\pi d}{\lambda_i} [\sin(\theta) - \sin(\theta_k)]; d$ – расстоя-

ние между преобразователями антенны; λ_i – длина излучаемой волны на *i*-м частотном диапазоне.

Построим характеристики направленности по формуле (2) для углов компенсации θ_k (рис. 1).

Направленные свойства антенны учтены за счет умножения характеристики направленности для каждого угла компенсации θ_k на интенсивность сигнала, пришедшего от объекта, рассчитанную относительно влияния среды [5]:

$$S(\theta_k) = I_{i,j}R(\alpha, \theta, \theta_k),$$

где а – заданный пеленг на объект.

Учитывая отсутствие информации о параметрах принимаемого сигнала, необходимо произвести суммирование по всему частотному диапазону приема антенны для охвата всех составляю-





щих излучения волны от цели. Исходя из этого получим сигнал в рассматриваемом частотном диапазоне:

$$T(\theta_k) = \sum_{i=f_{\rm H}}^{f_{\rm B}} I_{i,j}^2 R^2(\alpha_j, \theta_k), \qquad (3)$$

где $f_{\rm H_s} f_{\rm B}$ – нижняя и верхняя границы рассматриваемого частотного диапазона.

После суммирования по формуле (3) характеристика направленности будет иметь вид, как на рис. 2.

Как видно из рисунка, ширина характеристики направленности увеличилась и отсутствуют дополнительные максимумы, что положительно сказывается на точности пеленгования целей.

В условиях помехо-сигнальной обстановки на антенну ГПБА приходит не только полезный сигнал, но и помехи, которые обусловлены шумами различных источников надводного и подводного мира: надводные корабли, подводные лодки, шумы биологических животных, гражданские суда. Наибольший вклад в естественные шумы вносят активные средства обнаружения: гидролокаторы, эхолоты и т. д. Таким образом, представляется необходимым оценить влияние помехи на характеристику направленности в условиях реальной обстановки.

Вид сигнала $A(\theta)$, который поступает на антенну ГПБА от объекта, имеет вид, представленный на рис. 3, а сигнал с учетом влияния на него помехи $A_{III}(\theta)$ – на рис. 4.

Расчет принимаемой помехи и ее влияния на уровень и качество принимаемого сигнала можно

осуществить исходя из принимаемого уровня дисперсии полезного сигнала равного 10 %.



Также уровень принимаемой на ГПБА помехи можно оценить в частотном диапазоне с помощью следующей формулы:

$$W(\theta_k) = \sum_{i=f_{\rm H}}^{f_{\rm B}} \frac{P^2}{K(\theta_k, \lambda_i) f_i^2}$$

где P – давление сигнала в точке излучения; $K(\theta_k, \lambda_i)$ – коэффициент осевой концентрации.

Коэффициент осевой концентрации будем искать в виде [6] неврировании обнаруживаемого объекта и возникают ситуации, когда скорости и курсы движения объектов таковы, что их невозможно классифицировать по изменению пеленга. Может возникнуть случай, когда направление движения объекта, который находится на расстоянии *z* от корабля-носителя, совпадает с его курсовым углом, а близкорасположенный источник движется в направлении, совпадающем с курсом корабляносителя. В таком случае классификация обнаруженного объекта будет невозможна.

$$K(\theta_k, \lambda_i) = \frac{\left|\sum_{q=1}^n A_q\right|}{\sum_{q=1}^n \sum_{a=1}^n \left\{A_q A_a \cos\left[k_i d\left(q-a\right)\sin\left(\theta_k\right)\right]\right\} \frac{\sin\left[k_i d\left(q-a\right)\right]}{k_i d\left(q-a\right)}},\tag{4}$$

12

ī.

Таблииа 1

где A_q – амплитудное частотно-зависимое распределение антенны ГПБА (в рассматриваемой задаче равно 1); q, a – индексы суммирования; k_i – волновое число; d – шаг антенной решетки.

В табл. 1 приведены расчетные значения коэффициента концентрации по формуле (4) при значении n = 81.

Номер простран-	Угол	Коэффициент
ственного канала	компенсации,°	концентрации
1	-90	96
2	-86.43	81
3	-82.257	62
478	-77.16177.161	48
79	82.257	62
80	86.43	81
81	90	96

Имея значения коэффициента концентрации на определенных углах компенсации с учетом соответствующего номера пространственного канала можно определить уровень шумовой помехи для каждого канала.

Классификация обнаруженных объектов может идти по многим характеристикам самой цели: по скорости хода, по шумности объекта, по дискретной составляющей спектра пришедшего сигнала. В данной статье основным признаком, по которому реализуется алгоритм классификации, служит вынесение решения о том, от какого количества объектов пришел сигнал: от одиночного объекта либо от группы объектов. В таком случае классификации основной признак – это уровень сигнала в частотном диапазоне. В большинстве случаев имеется некоторая ограниченность в маДля нахождения акустической протяженности сигнала по уровню 0.707 (-3 дБ) относительно максимального значения сигнала и по отношению сигнал/помеха реализуется алгоритм расчета, с помощью которого выполняется сравнение каждого значения массива, состоящего из значений принятого сигнала с некоторым заданным порогом – либо уровнем сигнала, равным 0.707 от максимального значения, либо отношением сигнал/помеха [7].

Отношение сигнал/помеха для сравнения со значением сигнала вычисляется по следующей формуле:

$$OC\Pi = 20 \log \left(\frac{A}{A_N}\right),$$

где *А* – уровень полезного сигнала; *А_N* – уровень шумовой помехи.

Для реализации алгоритма необходимо создать массив, в который в реальном времени в режиме шумопеленгования записывается значение «1» в случае превышения значением сигнала уровня отношения сигнал/помеха или уровня 3 дБ, либо «0», если значение сигнала меньше рассматриваемого уровня. Таким образом, в процессе работы формируется массив значений, в котором находятся начальное и конечное превышения (изменения значения массива с «0» на «1» и с «1» на «0») заданного уровня отношения сигнал/помеха, т. е. фактически акустическая протяженность будет находиться как разность углов, на которых произошли изменения значения в массиве. Введем еще один классификационный признак – асимметрию сигнала, по которой также можно определить, от какой цели пришел сигнал – одиночной или групповой. Асимметрия – это центральный момент третьего порядка при оценке и математически может быть определена следующим образом [8]:

$$\eta = \frac{\mu_3}{\sigma_r^3},$$

где η – коэффициент асимметрии; μ_3 – центральный момент третьего порядка; σ_x^3 – среднеквадратическое отклонение.

Оценку асимметрии сигнала можно провести двумя методами – методом площадей и вероятностным методом.

При оценке асимметрии сигнала методом площадей необходимо найти угловую координату, на которой принятый сигнал имеет максимальное значение. Затем по уровню 0.707 от максимального значения сигнала находятся две угловые координаты. Под полученной областью на графической зависимости вычисляются площади сигнала слева и справа относительно максимума сигнала. Исходя из того что сигнал моделируется по дискретным отсчетам углов пеленга, то для нахождения площади под сигналом на графике необходимо определить интегральную сумму на заданном промежутке от первого углового отсчета до положения максимума для «левой части» сигнала и от положения максимума до последнего углового отсчета для «правой части» сигнала. Полученная интегральная сумма будет определять площади двух половин сигнала.

Формула для расчета «левой части» сигнала вычисляется по следующей формуле:

$$S_1 = \sum_{i=\theta_1}^{\theta_m} A_i \Delta \theta_k,$$

где θ_1 – первый отсчет акустической протяженности сигнала; θ_m – угол, при котором наблюдается максимум сигнала; A_i – значения уровней сигнала при каждом значении угла; $\Delta \theta_k$ – разность между (i + 1)-м и *i*-м угловыми отсчетами.

Формула для расчета «правой части» сигнала вычисляется по следующей формуле:

$$S_2 = \sum_{i=\theta_1}^{\theta_{m2}} A_i \Delta \theta_k$$

где θ_{m2} – конечный отсчет акустической протяженности сигнала.

Вычисляя отношение S_1/S_2 , можно определить степень симметрии сигнала. Если отношение $S_1/S_2 = 1$, то можно говорить о симметричности сигнала, в противоположном случае сигнал имеет некоторую асимметрию.

При использовании вероятностного метода, основанного на аппарате математической статистики, ставится задача определения асимметрии зависимости уровня сигнала, измеренного на разных пеленгах тракта кругового обзора. Для определения асимметрии этим методом вводится в рассмотрение уровень сигнала A_i как плотность распределения случайной величины – пеленга объекта. Для наглядности представления результатов вводится нормировка, чтобы сумма всех отсчетов, аналогично плотности распределения, была равна 1.

Тогда коэффициент асимметрии уровней сигнала рассчитывается по следующей формуле [9]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=0}^{N} \frac{P_i}{y} (x_i - x_{cp})^3}{\left[\sqrt{\sum_{i=0}^{N} \frac{P_i}{y} (x_i - x_{cp})^2} \right]^3},$$

где P_i – значения уровней сигнала; y – сумма всех отсчетов сигнала по значениям пеленга; x_i – уровень сигнала; x_{cp} – математическое ожидание уровней сигнала.

Если $\eta = 0$, то значения уровней сигнала на различных пеленгах симметричны, а в противоположном случае – нет.

Теперь, когда имеются все необходимые данные для реализации алгоритма, рассмотрим различные варианты приема сигнала антенной ГПБА в зависимости от его частоты, расстояния до объекта, его шумности и расположения цели относительно азимута.

Для начала необходимо провести анализ зависимости акустической протяженности и асимметрии сигнала, вычисленной по двум представленным методам, со следующими исходными данными: расстояние до объекта – 3000 м, приведенная шумность – 1 Па/ $\sqrt{\Gamma \mu}$, номер отсчета по частоте – 100, угловое положение относительно траверза – 0°.

Тогда, выполняя построение характеристики направленности $R(\theta)$ для угла приема ГПБА, равного 0°, можно получить необходимые характеристики. Характеристика направленности для данного случая представлена на рис. 5.

.....



Выполняя энергетическое суммирование, добавление помехи и пересчет сигнала с учетом влияния среды, получим вид характеристики направленности $R_{\rm m}(\theta)$, представленный на рис. 6.



Изменяя значение углового положения относительно траверза, например на 30°, получим аналогичные графики для характеристики направленности после энергетического суммирования (рис. 7).

Имея построенные значения изменения давления в зависимости от углового положения, получим характеристики, представленные в табл. 2.



Из таблицы видно, что по мере увеличения отклонения направления приема от направления траверза (т. е. по мере увеличения угла сканирования) происходит увеличение значения акустической протяженности, что обусловливается увеличением ширины характеристики направленности. При увеличении углового положения значение асимметрии по методу площадей плавно возрастает, что свидетельствует об асимметрии исследуемого сигнала в одну из сторон. Асимметрия по вероятностному методу уменьшается, что соответствует физическому смыслу [9].

В статье исследован тракт приема гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре. Определена интенсивность сигнала относительно среды, в которой происходит распространение. Рассмотрены основные параметры сигнала и среды, влияющие на интенсивность сигнала. Характеристика направленности ГПБА соответствует характеристике направленности инейной дискретной эквидистантной антенны с заданным распределением углов компенсации θ_k . Приведенная характеристика направленности построена для различных углов компенсации антенны. Учтены направленные свойства антенны за счет умножения характеристики направленности

Таблица 2

Угловое положение, °	Акустическая протяженность (по уровню 0.707),°	Асимметрия (метод площадей)	Асимметрия (вероятностный метод)
0	9.1	0.90	0.12
20	9.9	1.09	0.05
40	11.2	1.13	0.02
60	22.4	2.00	-0.02

для каждого угла компенсации θ_k на интенсивность сигнала. Проведено энергетическое суммирование по всему частотному диапазону приема антенны для учета всех составляющих излучения волны от цели. Введено в рассмотрение два классификационных признака: отражение от количества объектов и асимметрия сигнала. В соответствии с этим для

разных угловых положений найдены двумя способами асимметрия сигнала и акустическая протяженность сигнала. Полученные данные используются в задачах классификации обнаруженных объектов на основе приема излучаемых ими шумовых сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.

2. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990.

3. Сташкевич А. П. Акустика моря Л.: Судостроение, 1996.

4. Крылов В. В. Основы теории излучения и рассеяния звука. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989.

5. Гийес Л., Сабате П. Основы акустики моря. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967.

K. E. Abbakumov, I. S. Bobrikov, A. V. Vagin Saint Petersburg Electrotechnical University

THE STUDY OF THE RECEPTION TRACT OF A FLEXIBLE EXTENDED TOWED ANTENNA AT A CIRCULAR OVERVIEW

The question of the formation of the directivity characteristic in the path of receiving flexible long towed antenna with a circular review has been reviewed. The intensity of the signal was determined taking into account the influence of the environment on its propagation. The main parameters of the environment and the signal affecting on the intensity value are analyzed. The directivity characteristic of a flexible long towed antenna for different compensation angles is described. Accounting for the directional properties of the antenna is introduced by multiplying the directional characteristic on the signal intensity. Energy summation was produced over the entire frequency range of the antenna. The classification signs are determined: the acoustic length and asymmetry of the signal. This signs are the basis by which will be decided: is the signal came from a group or a single object. The acoustic length and asymmetry of the signal are calculated for different angular positions by two methods: the area method and the probabilistic method.

Directivity characteristic, signal model, extended antenna, circular view, intensity of the signal, concentration ratio

6. Справочник по гидроакустике / А. П. Евтютов, А. Е. Колесников, А. П. Ляликов и др. Л.: Судостроение, 1982.

7. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1978.

8. Ольшевский В. В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1973.

9. Kinsler L. E., Frey A. R. Fundamentals of acoustics. New York: John Wiley & Sons, 1950.

УДК 534.232

И.С. Пестерев

ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"»

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

Обобщенная модель преобразователя волноводного типа. Задача синтеза

Рассматривается решение задачи об излучении и возбуждении преобразователя волноводного типа (ПВТ) с использованием метода частичных областей. ПВТ образован соосным набором водозаполненных пьезоцилиндров с амплитудно-фазовым возбуждением, которое обеспечивает режим широкополосного излучения по типу бегущей волны через водозаполненные апертуры преобразователя в граничащие с ними конусные полупространства, изменяемые по углу раскрыва. Приводятся и анализируются результаты расчетов частотных характеристик звукового давления при излучении ПВТ, возбуждаемого в соответствии с решением задачи синтеза, во фронтальном и тыльном направлениях. Учитывается влияние толщины пассивных фланцев, которые используются для компоновки ПВТ в антеннах. Дается сопоставительная оценка с результатами экспериментальных исследований. Рассматривается влияние отраженных от апертур ПВТ звуковых волн на сопротивление излучения пьезоцилиндров и на возбуждающие их электрические напряжения в зависимости от угла раскрыва конусных полупространств.

Широкополосность, преобразователь волноводного типа, решение задачи синтеза, частотные характеристики, сопротивление излучения

Одним из условий повышения эффективности работы различных гидроакустических систем является использование ими широкополосных преобразователей. Многие пути построения таких преобразователей традиционны: применение акустических согласующих структур, электрических корректирующих цепей, связанных мод колебаний, разночастотных преобразователей и др. [1]-[8]. Еще один путь построения широкополосных преобразователей – использование волноводного излучения [9]-[13]. С позиций достижения эффективного широкополосного излучения здесь можно выделить преобразователи волноводного типа (ПВТ), обеспечивающие полосу пропускания до 3...3.5 октавы [12], [13]. Благодаря своему построению и способу возбуждения образующих ПВТ элементов (пьезоцилиндров) эти преобразователи обладают не только сравнительно равномерной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), но и линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ) излучения. В [12]-[14] рассматривались принципы построения сверхширокополосных преобразователей волноводного типа (ПВТ), а также их расчетные и экспериментальные частотные и импульсные характеристики. В качестве расчетных моделей ПВТ ранее использовались два частных варианта решения задачи об излучении: в соосно расположенные с ПВТ водозаполненные волноводы [12] и в полупространства [14]. В данной статье рассматривается обобщенная расчетная модель ПВТ, излучающего в перестраиваемые по углу раскрыва конусные полупространства, которая позволяет объединить оба частных варианта решения и учесть влияние отраженных от излучающих апертур ПВТ волн на его полевые характеристики.

Постановка задачи с использованием метода частичных областей. Структура построения ПВТ, который реализован соосным набором N идентичных пьезоцилиндров радиусом a и высотой l, разделенных по торцам тонкими гибкими прокладками, приведена на рис. 1 (здесь показана только внутренняя, заполненная жидкостью область ПВТ); расстояние между центрами двух соседних пьезоцилиндров равно d [12], [14]. В отличие от модели ПВТ, рассмотренной в [15], в данной статье учитывается расположение между крайними пьезоцилиндрами (с номерами 1 и N) и внешней жидкой средой (например, водой) пассивных жестких цилиндрических вставок радиусом *а* и высотой *z*_{фл}, которые имитируют металлические фланцы корпусов реальных макетов антенн, составленных из ПВТ [13]. Другие геометрические параметры, используемые при решении задачи, указаны непосредственно на рис. 1. Внутренняя полость ПВТ заполнена жидкостью с акустическими параметрами, соответствующими параметрам внешней среды, и контактирует при этом с ней через фронтальную и тыльную излучающие апертуры фланцев. Внешняя поверхность ПВТ считается свободной. Пьезоцилиндры с номерами i = 1, 2, ..., N (обозначены в рамке на рис. 1) возбуждаются в общем случае частотно зависимыми электрическими напряжениями $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}$, где $U_{im}(\omega)$ и $\varphi_i(\omega)$ – ам-

плитуда и фаза; о – круговая частота.

В соответствии с геометрией обобщенной расчетной модели (рис. 1) ПВТ излучает звуковые волны через внешние апертуры фланцев в соосные фронтальную (индекс F) и тыльную (индекс T) полубесконечные конусные области с регулируемыми углами раскрыва $2\theta_F$ и $2\theta_T$. Если $\theta_{F,T} = \pi/2$, вершины конусов (точки O_F и O_T) перемещаются к плоскостям апертур ПВТ и излучение происходит с их поверхности в полупространства [14]. Когда $\theta_{F,T} = 0$, поверхности S_F и S_T совпадают с плоскостями апертур ПВТ и излучение происходит в соосстями апертур ПВТ и излучение происходит в сооссные цилиндрические волноводы [12]. Граничным условием на конических поверхностях (как [12] и [14]) служит равенство нулю нормальной к ним компоненты колебательной скорости.

Подобно алгоритму решения задачи, изложенному в [15], воспользуемся методом частичных областей [16], [17], согласно которому вся область существования звукового поля делится на частичные области I, II и III (рис. 1) отдельно для фронтального (индекс F) и тыльного (индекс T) направлений излучения. При этом границей областей I и II служат плоскости излучающих апертур ПВТ, а областей II и III – поверхности S_F и S_T . В каждой из частичных областей звуковое поле определяется в виде суммы известных частных решений уравнения Гельмгольца с неопределенными коэффициентами. Затем эти области «сшиваются» с учетом выполнения условий сопряжения звуковых давлений и колебательных скоростей на их границах. Полевые характеристики ПВТ с учетом характера его электрического возбуждения определяются отдельно для каждого пьезоцилиндра с последующим суммированием по принципу суперпозиции.

Рассмотрим вначале звуковое поле, формируемое *i*-м пьезоцилиндром в областях I–III во фронтальном направлении ПВТ. При этом следует учесть, что на границе цилиндрической и конусообразной областей расчетной модели ПВТ используются две системы координат с общим центром в точке O_F : цилиндрическая (ρ , φ , z) и сферическая (r, θ , φ). Ввиду осевой симметрии задачи зависимость от угла φ отсутствует. В цилиндрической системе координат звуковое поле *i*-го пьезоцилиндра в области I представим в виде суммы падающей волны [12] с коэффициентами A_n и подобной ей отраженной волны с неопределенными коэффициентами B_n :

$$p_i^{\mathrm{I}} = K_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jk_n z_{Fi}} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{jk_n (z-z_F)} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n e^{jk_n z_{Fi}} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{-jk_n (z-z_F)} \right], \quad (1)$$

где $K_i = -2v_i z_0 k_0 a$, $v_i = v_{im}(\omega) e^{j \Psi_i(\omega)}$ – радиальная компонента колебательной скорости пьезоци-


линдра; $v_{im}(\omega)$ и $\psi_i(\omega)$ – амплитуда и фаза; $z_0 = \rho_0 c_0$; $k_0 = \omega/c_0$; ρ_0 и c_0 – плотность и скорость звука в жидкости, заполняющей ПВТ (например, вода); $A_n = \frac{\sin(k_n l/2)}{J_0(\beta_n)(k_n a)^2}$; $k_n =$

.....

= $\sqrt{k_0^2 - (\beta_n/a)^2}$; β_n – корни уравнения $J_1(\beta_n) = 0, n = 0, 1, 2, ...$ Звуковое давление в области III определяется в сферических координатах [16]:

$$p_i^{\text{III}} = K_i \sum_{m=0}^{\infty} E_m P_m \left(\cos \frac{\pi \theta}{\theta_F} \right) h_m^{(1)} \left(k_0 r \right), \quad (2)$$

где E_m – неопределенные коэффициенты; $P_m \left(\cos \frac{\pi \theta}{\theta_F} \right)$ – полиномы Лежандра; $h_m^{(1)}(k_0 r)$ – сферические функции Ханкеля первого рода. Поли-

сферические функции Ханкеля первого рода. Полиномы Лежандра для конусной области III $(0 \le \theta \le \theta_F)$ записаны с учетом их отображения на полную сферу $(0 \le \theta \le \pi)$, что позволяет сохранить свойство ортогональности [18].

Звуковое поле в частичной области II образовано суммой двух волн: прошедшей из области I и подобной волне в области III, для которой в качестве радиальной компоненты выбрана сферическая функция Бесселя $j_m(k_0r)$, непрерывная на промежутке $0 \le r < \infty$:

$$p_i^{\Pi} = K_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{jk_n z_{Fi}} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{jk_n (z - z_F)} + \sum_{m=0}^{\infty} D_m P_m \left(\cos \frac{\pi \theta}{\theta_F} \right) j_m (k_0 r) \right], \quad (3)$$

где *C_n* и *D_m* – неопределенные коэффициенты.

Решение для частичной области II может быть получено и с использованием сферической функции Ханкеля $h_m^{(1)}(k_0 r)$, но только для $\theta_{F,T} < \pi/2$, когда исключается ее особенность при r = 0. Для выполнения последующих преобразований выражение (3) на границе областей I, II $(z = z_F)$ удобно представить в принятой цилиндрической системе координат, заменяя сферичеθ ские координаты и *r* на $\theta_{II} =$ = arccos $\left[\sqrt{z_F^2 / (z_F^2 + \rho^2)} \right]$ и $r_{\rm II} = \sqrt{z_F^2 + \rho^2}$, а на границе областей II, III $(r = r_F)$ – в сферических координатах с заменой ρ , z на $\rho_{cb} = r_F \sin \theta$ и $z_{\rm cb} = r_F \cos \theta$.

В соответствии с алгоритмом решения по методу частичных областей [16] неизвестные коэффициенты в (1)–(3) определяются с использованием системы функциональных уравнений, объединяющей условия сопряжения звуковых давлений и колебательных скоростей на границах областей:

$$p_{i}^{\mathrm{I}} = p_{i}^{\mathrm{II}}; \ \frac{\partial p_{i}^{\mathrm{I}}}{\partial z} = \frac{\partial p_{i}^{\mathrm{II}}}{\partial z} \bigg\}, \ z = z_{F}, \ 0 \le \rho \le a;$$

$$p_{i}^{\mathrm{II}} = p_{i}^{\mathrm{III}}; \ \frac{\partial p_{i}^{\mathrm{II}}}{\partial r} = \frac{\partial p_{i}^{\mathrm{III}}}{\partial r} \bigg\}, \ r = r_{F}, \ 0 \le \theta \le \theta_{F}.$$

$$(4)$$

Подстановка выражений (1)–(3) в граничные условия (4) и последующая алгебраизация полученных уравнений с использованием интегральных соотношений для функций Бесселя и полиномов Лежандра [18] приводит к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} B_m - C_m - \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn}^{(1)} D_n = -A_m; \\ B_m + C_m + \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn}^{(2)} D_n = A_m; \\ \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn}^{(3)} C_n + j_m (k_0 r_F) D_m - h_m^{(1)} (k_0 r_F) E_m = 0; \\ \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn}^{(4)} C_n + j'_m (k_0 r_F) D_m - h_m^{(1)'} (k_0 r_F) E_m = 0, \end{cases}$$
(5)

где

$$\begin{split} I_{mn}^{(1)} &= \frac{2e^{-jk_{m}z_{Fi}}}{\left[J_{0}\left(\beta_{m}\right)\right]^{2}} \int_{0}^{1} P_{n}\left(C_{\Pi}\right) j_{n}\left(k_{0}r_{\Pi}\right) J_{0}\left(\beta_{m}x\right) x \, dx \, ; \\ I_{mn}^{(2)} &= \frac{-2je^{-jk_{m}z_{Fi}}}{\left(k_{m}a\right) \left[J_{0}\left(\beta_{m}\right)\right]^{2}} \int_{0}^{1} \left[P_{n}'\left(C_{\Pi}\right) S_{\Pi} \frac{\pi}{\theta_{F}} \frac{x}{\left(r_{\Pi}/a\right)^{2}} \times j_{n}\left(k_{0}r_{\Pi}\right) + P_{n}\left(C_{\Pi}\right) j_{n}'\left(k_{0}r_{\Pi}\right) \frac{k_{0}z_{F}}{r_{\Pi}/a} \right] J_{0}\left(\beta_{m}x\right) x \, dx ; \\ x &= \rho/a \, ; \ C_{\Pi} &= \cos\left(\pi\theta_{\Pi}/\theta_{F}\right) \, ; \ S_{\Pi} &= \sin\left(\pi\theta_{\Pi}/\theta_{F}\right) \, ; \\ I_{mn}^{(3)} &= \frac{2m+1}{2}e^{jk_{n}z_{Fi}} \times \\ &\times \int_{0}^{\theta_{F}} J_{0}\left(\frac{\beta_{n}}{a}\rho_{c\varphi}\right) e^{jk_{n}\left(z_{c\varphi}-z_{F}\right)} P_{m}\left(\cos \vartheta\right) \sin \vartheta \, d\vartheta ; \\ I_{mn}^{(4)} &= \frac{2m+1}{2}e^{jk_{n}z_{Fi}} \int_{0}^{\theta_{F}} \left[-J_{1}\left(\frac{\beta_{n}}{a}\rho_{c\varphi}\right) \left(\frac{\beta_{n}}{k_{0}a}S_{c\varphi}\right) + \end{split}$$

$$+ J_0 \left(\frac{\beta_n}{a} \rho_{c\phi} \right) \frac{jk_n}{k_0} C_{c\phi} \bigg] \times$$
$$\times e^{jk_n (z_{c\phi} - z_F)} P_m (\cos \vartheta) \sin \vartheta \, d\vartheta;$$
$$\vartheta = \pi \theta / \theta_F; \quad C_{c\phi} = \cos(\theta_F \vartheta / \pi);$$
$$S_{c\phi} = \sin(\theta_F \vartheta / \pi).$$

Система уравнений для тыльного направления ПВТ, аналогичная (5), может быть получена с учетом переноса начала используемых сферической и цилиндрической систем координат из точки O_F в точку O_T . При этом она может быть записана в виде (5) с учетом замены для используемых величин индекса F на T, а также изменения знака на противоположный у фазовых показателей экспонент в выражениях для интегралов $I_{mn}^{(1, 2, 3, 4)}$, т. е. $e^{jk_m z_{Ti}}$, $e^{-jk_n z_{Ti}}$ и $e^{jk_n z_T}$. Решение полученных систем уравнений осуществляется методом редукции.

Полные звуковые давления в частичных областях I-III обобщенной расчетной модели ПВТ могут быть определены согласно принципу суперпозиции суммированием парциальных давлений, создаваемых всеми і-ми пьезоцилиндрами во фронтальном и тыльном направлениях ПВТ. В частности, для определения полевых характеристик ПВТ можно записать: $p_{F,T}^{III} = \sum_{i=1}^{N} p_{iF,T}^{III}$. При этом следует учесть, что в формулах для итоговых звуковых давлений $p_{F,T}^{\rm III}$ выполняется двойное суммирование как по числу пьезоцилиндров, так и по заданному порядку системы уравнений, определяемому условием сходимости ее решения. В выражения для всех парциальных давлений входит множитель $K_i = -2v_i z_0 k_0 a$, который зависит от задаваемых значений колебательной скорости $v_i = v_{im}(\omega)e^{j\Psi_i(\omega)}$. В постановке задачи синтеза [12]: амплитуды $v_{im}(\omega) = v_m = \text{const}$, а фазы $\psi_i(\omega) = k_0 d(i-1)$ обеспечивают формирование звукового поля во внутренней области ПВТ в виде бегущей волны.

Результаты расчетов АЧХ излучения. Проанализируем влияние изменения углов раскрыва конусных полупространств обобщенной модели ПВТ в интервале $0 < \theta_{F,T} \leq 90^{\circ}$ на его расчетные АЧХ излучения. При $\theta_{F,T} = 0$ вершины правого и левого конусов O_F и O_T смещаются к бесконечности, поэтому в данной работе для случая излучения в волновод принято значение $\theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$. На рис. 2, а приведены нормированные АЧХ звуковых давлений $|p_{FT}^{\text{III}}|$ ПВТ при излучении во фронтальном (кривые 1-4) и тыльном (кривые 1'-4') направлениях на его оси в удаленной точке наблюдения (z/a = 10l/a), для углов раскрыва конусных областей: $l(1') - \theta_{FT} = 0.1^{\circ}; 2(2') - 0.1^{\circ}; 2(2')$ $\theta_{FT} = 30^{\circ}; \ 3(3') - \theta_{FT} = 60^{\circ}; \ 4(4') - \theta_{FT} = 90^{\circ}.$ Ввиду уменьшения звукового давления (более чем на порядок) при изменении углов раскрыва от $\theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$ до $\theta_{F,T} = 90^{\circ}$, обусловленного увеличением области расхождения звуковой волны, графики для каждого значения угла раскрыва нормированы к звуковому давлению во фронтальном направлении при $k_0 a \approx 2$, т. е. на частоте радиального резонанса пьезоцилиндра. Аналогичным образом на рис. 2, б построены графики АЧХ звуковых давлений $\left| p_{F,T}^{\text{III}} \right|$ ПВТ при использовании сферической функции Ханкеля для определения волны (3) в частичной области II (вместо сферической функции Бесселя) для углов раскрыва: $l(l') - \theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$; $2(2') - \theta_{F,T} = 20^{\circ}$; $3(3') - 0^{\circ}$ $\theta_{FT} = 40^{\circ}$. Результаты расчета получены для значений параметров ПВТ N = 10; l/a = 0.6; d/a = 0.66, $z_{\rm dt}/a = 0.95 l/a$ в диапазоне частот формирования квазиплоской волны (*k*₀*a* < β₁ ≈ ≈ 3.83) [15].

При увеличении углов раскрыва конических областей излучения происходит последовательное изменение АЧХ звуковых давлений от вида, соответствующего излучению в соосные волноводы [12], до вида АЧХ излучения в полупространства [14]. Сопоставление результатов расчетов, приведенных в данном исследовании и в [15], показывает, что учет в составе обобщенной расчетной модели пассивных фланцев, используемых для компоновки ПВТ в антеннах, приводит к сглаживанию АЧХ звуковых давлений, полученных при малых углах раскрыва конических области II сферической функции Бесселя (рис. 2, *a*). Кро-



ме того, наличие фланцев заметно повышает степень сопряжения звуковых давлений на границе цилиндрической и конусообразной областей обобщенной модели ПВТ. Выбор в частичной области II сферической функции Ханкеля (рис. 2, δ) в качестве радиальной компоненты волны приводит к отсутствию флуктуаций амплитуды, наблюдаемых при использовании сферической функции Бесселя. Однако при этом для углов раскрыва конусных полупространств $\theta_{F,T} > 45^{\circ}$ начинает проявляться увеличение невязки звуковых давлений на границе областей I и II, а на нижней границе рабочего диапазона частот ПВТ $(k_0 a < 0.5)$ уровень тыльного излучения начинает превышать уровень фронтального, что противоречит физическому смыслу. Независимо от выбора типа сферической функции, во фронтальном направлении сохраняется близкий к линейному характер ФЧХ излучения ПВТ [12] во всем диапазоне значений углов раскрыва $\theta_{F.T}$.

Увеличение углов раскрыва $\theta_{F,T}$ приводит к снижению уровня излучения в интервале



 $0.5 > k_0 a > 0$ (рис. 2) ввиду все большего расхождения волнового фронта в конических полупространствах и уменьшения нагруженности излучающих апертур ПВТ, что позволяет объяснить вид АЧХ излучения макетов антенн, составленных из ПВТ [13]. В качестве примера на рис. 3, а показаны экспериментальные АЧХ чувствительности в режиме излучения у, Па · м/В во фронтальном и тыльном направлениях (кривые 1 и 1') макета 1 (частота резонанса пьезоцилиндров ПВТ $f_{\rm p}$ = 30 кГц) и соответствующие им расчетные АЧХ звукового давления $\left| p_{F,T}^{\text{III}} \right|$ при $\theta_{F,T} = 40^{\circ}$ (в частичной области II используется сферическая функция Ханкеля), приведенные к значению чувствительности макета на частоте fp (кривые 2 и 2'). Аналогичным образом на рис. 3, б представлены экспериментальные (кривые 1 и 1') и расчетные (кривые 2' и 2') АЧХ излучения макета 2 (f_p = 44 кГц). Здесь параметры обобщенной модели ПВТ соответствуют параметрам ПВТ, используемых в составе макетов [13].



39

Видно, что в основном рабочем диапазоне частот ПВТ расчетные АЧХ звуковых давлений, полученные для средних значений углов раскрыва конических полупространств обобщенной модели ПВТ, вполне удовлетворительно соответствуют экспериментально полученным АЧХ излучения рассматриваемых макетов. Причем это соответствие проявляется как для общего вида частотных характеристик излучения макетов, так и для реализуемой ширины полосы пропускания (около 3–3.5 октав).

Определение сопротивлений излучения. Реализация указанных частотных характеристик излучения требует соответствующего способа электрического возбуждения ПВТ, который базируется на решении для преобразователя задачи синтеза [12]. Для постановки задачи синтеза необходимо располагать сведениями о нагрузочных характеристиках пьезоцилиндров ПВТ, и в частности - об их сопротивлении излучения. В публикациях [12] и [14] рассматривался характер нагруженности пьезоцилиндров для частных случаев излучения ПВТ в соосно расположенные цилиндрические волноводы и в полупространства. При использовании обобщенной расчетной модели излучение осуществляется в конусные области, изменение раскрыва которых, как показано ранее, приводит к изменению нагруженности излучающих апертур ПВТ, что сказывается на виде частотных зависимостей сопротивлений излучения и напряжений возбуждения его пьезоцилиндров.

Для определения сопротивлений излучения пьезоцилиндров необходимо предварительно рассмотреть характер распространения падающих и отраженных от излучающих апертур звуковых волн во внутренней водозаполненной полости ПВТ, или частичной области I его обобщенной модели. На соответствующей схеме, приведенной на рис. 4, стрелками со сплошными линиями показаны звуковые волны, сформированные *i*-м пьезоцилиндром, а стрелками со штриховыми линиями – *k*-м пьезоцилиндром. Здесь удобно, в отличие от схемы обобщенной расчетной модели (см. рис. 1), перенести начало отсчета цилиндрической системы координат (ρ , ϕ , *z*) в геометрический центр *i*-го пьезоцилиндра. При этом экспоненциальный множитель $e^{\pm jk_n(z+z_{F,T\,i}-z_{F,T})}$ в выражении для звукового давления *i*-го пьезоцилиндра справа $p_{Fi0}(\rho, z)$ и слева $p_{Ti0}(\rho, z)$ от него меняется на $e^{\pm jk_n z}$:

$$p_{F,Ti0}(\rho,z) = -2z_0 v_i k_0 a \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_0\left(\beta_n \frac{\rho}{a}\right) e^{\pm jk_n z}.$$
 (6)

Звуковое давление $p_{Fi0}(\rho, z)$ соответствует падающей волне, определяемой первым слагаемым (1). Выражение для звукового давления волны, отраженной от фронтальной (индекс *F*) или тыльной (индекс *T*) апертуры ПВТ, можно записать в следующем виде:

$$p_{F,T\,i1}(\rho,z) = -2z_0 v_i k_0 a \times$$
$$\times \sum_{n=0}^{\infty} B_{F,T\,in} e^{\pm j 2k_n z_{F,T\,i}} J_0\left(\beta_n \frac{\rho}{a}\right) e^{\mp j k_n z}, \quad (7)$$

где $B_{F,T in}$ – коэффициенты B_n для *i*-го пьезоцилиндра, соответствующие отраженной волне в частичной области I (второе слагаемое (1)) и полученные в результате решения систем уравнений вида (5) для фронтального и тыльного направлений излучения. Суммарные фазовые сдвиги для отраженных звуковых волн $p_{F,Ti1}(\rho, z)$, воздействующих на *i*-й пьезоцилиндр со стороны фронтальной и тыльной апертур ПВТ, определяются показателями экспоненциальных множителей $e^{j2k_n z_{Fi}}$ и $e^{-j2k_n z_{Ti}}$.

Выражения для звуковых волн, воздействующих на *i*-й пьезоцилиндр со стороны *k*-го пьезоцилиндра, подобны (6) и (7) за исключением величины фазовых сдвигов:



$$p_{F,T k0}(\rho, z) = -2z_0 v_k k_0 a \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_0\left(\beta_n \frac{\rho}{a}\right) e^{jk_n d|i-k|} e^{\pm jk_n z}; \qquad (8)$$

$$p_{F,T k1}(\rho, z) = -2z_0 v_k k_0 a \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} B_{F,T kn} e^{\pm jk_n \left(z_{F,T k} + z_{F,T i}\right)} J_0\left(\beta_n \frac{\rho}{a}\right) e^{\mp jk_n z}. \qquad (9)$$

n=0

Непосредственное воздействие *k*-го пьезоцилиндра на *i*-й $(i \neq k)$ описывается (8). Причем в случае k > i (см. рис. 4) используется представление для $p_{Tk0}(\rho, z)$ с экспоненциальным множителем $e^{-jk_n z}$, а в случае $i > k - для p_{Fk0}(\rho, z)$ с множителем $e^{jk_n z}$. Фазовый слвиг $\pm jk_n(z_{F,T,k} + z_{F,T,i})$ в (9) определяется суммарным расстоянием, пройденным звуковой волной от k-го пьезоцилиндра до фронтальной или тыльной апертуры ПВТ $(z_{F,T,k})$ и в обратном направлении до *i*-го пьезоцилиндра (z_{FT}) .

Выражение для звукового давления, создаваемого *i*-м пьезоцилиндром в его внутренней области, запишем в виде [19]

$$p_{i0}^{(\Pi p)}(\rho, z) = j z_0 v_i \left[-\frac{J_0(k_0 a)}{J_1(k_0 a)} + 2k_0 a \sum_{n=0}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n \rho/a) \cos(k_n z/2) e^{jk_n l/2}}{J_0(\beta_n)(k_n a)^2} \right].$$

Собственное и взаимные сопротивления излучения пьезоцилиндров ПВТ удобно опреиспользуя общее делить, выражение $Z^{(S)} = -\int_{S} \tilde{p}_{\Sigma} D_n \ ds / \tilde{v}$, где \tilde{p}_{Σ} и \tilde{v} – комплексные

амплитуды суммарного звукового давления и колебательной скорости точки приведения; D_n приведенная скорость элемента поверхности ds. Для і-го пьезоцилиндра интегрирование выполняется по его внутренней боковой поверхности $S = 2\pi a l$, при этом $D_n = 1$ и $\tilde{v} = v_i$. С учетом осевой симметрии задачи и при условии равенства колебательных скоростей v_i (*i* = 1, 2, 3, ..., N) собственное $Z_{ii}^{(S)}$ и взаимные $Z_{ik}^{(S)}$ сопротивления излучения і-го пьезоцилиндра определяются следующими выражениями [19]:

$$Z_{ii}^{(S)} = -\frac{2\pi a}{v_i} \int_{-l/2}^{l/2} \left[p_{i0}^{(\Pi p)}(a, z) + p_{Fi1}(a, z) + p_{Ti1}(a, z) \right] dz = Z_{ii} + Z_{ii}^{(R)};$$
(10)

$$Z_{ik}^{(S)} = -\frac{2\pi a}{v_i} \int_{-l/2}^{l/2} \left[p_{F,T \ k0}(a,z) + p_{Fk1}(a,z) + p_{Tk1}(a,z) \right] dz = Z_{ik} + Z_{ik}^{(R)},$$
(11)

где

$$Z_{ii} = jz_0 S \left[\frac{J_0(k_0 a)}{J_1(k_0 a)} - \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(k_n l/2) e^{jk_n l/2}}{(k_n a)^3} \right]$$

- собственное и $Z_{ik} = z_0 S \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jk_n d|i-k|} G_n$ -

взаимные сопротивления излучения *i*-го пьезоцилиндра, не учитывающие воздействие на него звуковых волн, отраженных от излучающих апер-

$$Typ \quad \Pi BT; \quad Z_{ii}^{(R)} = z_0 S \frac{4k_0 a}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \left[B_{Fin} e^{j2k_n z_{Fi}} + B_{Tin} e^{-j2k_n z_{Ti}} \right] G_n \quad \text{M} \quad Z_{ik}^{(R)} = z_0 S \frac{4k_0 a}{l/a} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[B_{Fkn} e^{jk_n (z_{Fk} + z_{Fi})} + B_{Tkn} e^{-jk_n (z_{Fk} + z_{Ti})} \right] G_n \quad -$$

составляющие собственного и взаимных сопротивлений излучения, учитывающие влияние отраженных волн; $G_n = J_0(\beta_n) \frac{\sin(k_n l/2)}{k_n a}$. Полное сопротивление излучения *i*-го пьезоцилиндра определяется с учетом взаимодействия по полю с другими пьезоцилиндрами ($v_i \neq v_k$, $i \neq k$) выражением [12]: $Z_{Si} = Z_{i1}^{(S)} \frac{v_1}{v_i} + Z_{i2}^{(S)} \frac{v_2}{v_i} + \dots + Z_{ii}^{(S)} + \dots +$ $+Z_{iN}^{(S)}\frac{v_N}{v_i}$.

В предположении, что возбуждение ПВТ осуществляется в соответствии с решением задачи синтеза, на рис. 5 приведены частотные зависимости модуля полного сопротивления излучения *i*-х пьезоцилиндров $|z_{Si}| = |Z_{Si}|/z_0 S$ обобщенной модели с углами раскрыва конусных областей: $a - \theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$; $\delta - \theta_{F,T} = 30^{\circ}$; $\epsilon - \theta_{F,T} =$ $= 60^{\circ}$; *г* – $\theta_{FT} = 90^{\circ}$, при использовании в качестве радиальной компоненты волны в частичной





области II сферической функции Бесселя $j_m(k_0r)$. Номера кривых соответствуют: l - i = 1; 2 - i = 4; 3 - i = 7; 4 - i = 10. Принятые параметры ПВТ аналогичны используемым для определения АЧХ звуковых давлений (рис. 2): $N = 10; l/a = 0.6; d/a = 0.66; z_{\phi n}/a = 0.95l/a$.

Частотные зависимости $|z_{Si}|$, полученные для углов раскрыва $\theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$ (рис. 5, *a*) и $\theta_{F,T} = 90^{\circ}$ (рис. 5, *c*), демонстрируют вполне удовлетворительное соответствие полученным в частных случаях излучения в цилиндрические волноводы [12] и полупространства [14]. Для обобщенной модели ПВТ во всем рассматриваемом диапазоне углов раскрыва $\theta_{F,T}$ сохраняется отмечавшаяся ранее ([12], [14]) тенденция к увеличению значений $|z_{Si}|$ с ростом порядкового номера *i* пьезоцилиндра, но в основном в области частот вблизи и выше радиального резонанса пьезоцилиндра ($k_0a \approx 2$). В области более низких частот при использовании значений $\theta_{F,T}$, отличных от случая излучения в цилиндрические волноводы, в частотных зависимостях $|z_{Si}|$ заметно усиливаются осцилляции, обусловленные влиянием отраженных от излучающих апертур ПВТ волн. Это, в свою очередь, сказывается на увеличении уровня осцилляций в частотных зависимостях возбуждающих пьезоцилиндры электрических напряжений, полученных в результате решения задачи синтеза.

Электрические напряжения возбуждения ПВТ. Для постановки и решения задачи синтеза используется система уравнений [12], [14], которая описывает колебательный процесс *N* пьезоцилиндров, образующих ПВТ:

$$\sum_{k=1}^{N} Z_{ik}^{*} v_{k} = N_{T} U_{i}, \qquad (12)$$

где v_k – колебательная скорость *k*-го пьезоцилиндра, k = 1, 2, 3, ..., N; $N_T = 2\pi d_{31} l / S_{11}^{(E)}$ – коэффициент электромеханической трансформации (d_{31} – пьезомодуль, $S_{11}^{(E)}$ – упругая податливость); $Z_{ii}^* = Z_{ii}^{(S)} + Z_i^{(\Pi p)}$, i = k; $Z_{ik}^* = Z_{ik}^{(S)}$, $i \neq k$; $Z_{ii}^{(S)}$ и $Z_{ik}^{(S)}$ – собственное (10) и взаимные (11) сопротивления излучения *i*-го пьезоцилиндра;

.....

$$Z_{i}^{(\Pi p)} = z_{0}S\left[r_{Si}\frac{1-\eta}{\eta} - jQ\frac{n_{0\Pi}^{2}(k_{0}a)^{2} - 1}{n_{0\Pi}k_{0}a}\right] - \Pi pu-$$

веденный механический импеданс *i*-го пьезоцилиндра; r_{Si} – активная компонента полного сопротивления излучения $Z_{Si} = R_{Si} - jX_{Si} = z_0 S(r_{Si} - jx_{Si});$ η – механоакустический КПД; Q – предельная акустическая добротность пьезоцилиндра, $n_{0\Pi} = \left(1 + \frac{\delta}{2a}\right) \frac{c_0}{c_{\Pi}}, \delta$ и c_{Π} – толщина стенки пьезо-

цилиндра и скорость звука в его материале).

В результате решения системы уравнений (12) могут быть определены частотные зависимости электрических напряжений U_i , необходимые для реализации заданного амплитудно-фазового распределения колебательной скорости пьезоцилиндров ПВТ, в частности для задачи синтеза, когда $v_{im}(\omega) = v_m = \text{const}$ и $\psi_i(\omega) = k_0 d(i-1)$. В качестве примера на рис. 6 приведены частотные зави-

симости амплитуд U_{im} электрических напряжений для различных углов раскрыва конусных областей обобщенной модели ПВТ: $a - \theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$; $\delta - \theta_{F,T} = 30^{\circ}$; $e - \theta_{F,T} = 60^{\circ}$; $z - \theta_{F,T} = 90^{\circ}$, имеющего следующие параметры: N = 10; l/a = 0.6; d/a = 0.66; $z_{\phi \pi}/a = 0.95 l/a$; Q = 3; $\eta = 0.7$; $n_{0\pi} = 0.52$. Расчет выполнен в предположении $N_T/v_m = 1$; нумерация кривых аналогична рис. 5.

Наблюдаемые для частных расчетных моделей [12], [14] рост амплитуд электрических напряжений при увеличении порядкового номера пьезоцилиндра, а также сходство частотных зависимостей U_{im} с характеристиками полосового фильтра с регулируемым затуханием, максимальное значение которого приходится на область частот радиального резонанса пьезоцилиндров ($k_0 a \approx 2$), в целом повторяются и в случае использования обобщенной расчетной модели ПВТ. Электрические напряжения для угла раскрыва $\theta_{F,T} = 0.1^{\circ}$ (рис. 6, *а*) практически полностью воспроизводят полученные в частном случае из-









лучения ПВТ в соосно расположенные цилиндрические волноводы [12]. По мере увеличения углов раскрыва конусных полупространств ($\theta_{F,T} = 30, 60, 90^\circ$) в частотных зависимостях U_{im} повышается уровень осцилляций, что наиболее заметно проявляется для пьезоцилиндров с первыми номерами. Частотные зависимости амплитуд электрических напряжений, полученные в результате решения задачи синтеза для частной модели излучения ПВТ в полупространство [14] и для обобщенной модели с углами раскрыва $\theta_{F,T} = 90^\circ$ (рис. 6, *г*), тоже вполне удовлетворительно соответствуют друг другу.

Что касается фаз ϕ_i электрических напряжений U_i, то характер поведения их частотных зависимостей, как это ранее указывалось в [12] для частного случая излучения ПВТ в цилиндрические волноводы, последовательно изменяется с ростом номера пьезоцилиндра от вида, подобного излучения одиночного пьезоцилиндра ФЧХ (i = 1), до ФЧХ излучения ПВТ (i = 10). Увеличение углов раскрыва конусных полупространств обобщенной модели ПВТ диапазоне в $0 < \theta_{FT} \le 90^{\circ}$ сопровождается постепенным повышением уровня осцилляций ФЧХ напряжений U_i, в основном для пьезоцилиндров с начальными номерами. Указанные положения иллюстрируются графиками частотных зависимостей фаз ϕ_i электрических напряжений, приведенными на рис. 7 для двух крайних значений углов раскрыва конусных полупространств излучения ПВТ: в соосные волноводы ($\theta_{F,T} = 0.1^\circ$, рис. 7, *a*) и по-

лупространства ($\theta_{F,T} = 90^{\circ}$, рис. 7, δ); нумерация кривых соответствует рис. 5 и 6.

АЧХ звуковых давлений обобщенной модели ПВТ, полученные в результате решения задачи об излучении в конусные полупространства с углами раскрыва $\theta_{F,T} \approx (40 - 45)^{\circ}$, т. е. среднего значения в интервале $0 < \theta_{F,T} \le 90^{\circ}$, оптимальны для представления реального звукового поля, формируемого макетами гидроакустических систем на базе ПВТ. Учет в обобщенной модели корпусных фланцев макетов приводит к улучшению сходимости звуковых полей в области излучающих апертур ПВТ, а также к сглаживанию АЧХ излучения преобразователя. Частотные зависимости сопротивлений излучения и напряжений возбуждения пьезоцилиндров ПВТ, полученные с использованием обобщенной модели для крайних значений углов раскрыва ($\theta_{F,T} = 0.1$ и 90°), хорошо согласуются с результатами для частных моделей излучения в соосные цилиндрические волноводы и полупространства, а также демонстрируют достаточно плавное изменение рассматриваемых частотных характеристик при изменении углов раскрыва конусных полупространств. Полученные в результате решения задачи синтеза для обобщенной модели ПВТ частотные зависимости электрических напряжений возбуждения могут быть использованы для проведения более детальных исследований полевых и импульсных характеристик антенн, составленных из ПВТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широкополосность преобразователей. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. С. 696-697.

2. Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б. О расширении полосы пропускания пьезокерамических преобразователей с помощью переходных слоев // Акуст. журн. 1974. Т. 20, № 5. С. 663–668.

3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986.

4. Mc Mahon G. W. Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers // J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36, № 3. P. 528– 533.

5. Пат. РФ 2270533 МПК Н04R 1/14 Гидроакустический стержневой преобразователь / В. И. Позерн, Р. П. Павлов, О. Б. Ступак, Л. А. Виноградова, М. В. Кудрявцев, О. Н. Дудаков, Е. А. Апухтина. 2004.04.19. Опубл. 20.02.2006. Бюл. № 5.

6. Pat. USA 8072843 B1 MΠK H04R 17/00. Stepped multiply resonant wideband transducer apparatus / J. L. Butler, A. L. Butler. Pub. 06.12.2011.

7. Pat. USA 6722003 MTK H04R 17/00. Underwater broadband electroacoustic transducer / Dunn Sheng-Dong, Yeh Chi-Zen, Jih Jeng-Yow. Pub. 21.08.2003.

8. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. Chapters 2–4.

9. Pat. USA 4415998 M Π K G01V 1/40. Segmented acoustic transmitter for broad frequency investigation of a borehole / R. B. Blizard. Pub. 15.11.1983.

10. Pat. USA 4477783 MIIK H03H 7/34. Transducer device / W. E. Glenn, Ft. Lauderdale. Pub. 16.10.1984.

11. Мальцев Ю. В., Прокопчик С. Е. Гидроакустические волноводные антенны и перспективы их применения в технических средствах исследования океана // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2 (10). С. 51-71.

12. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 87–96.

13. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 60–70.

14. Степанов Б. Г. Излучение одиночным преобразователем волноводного типа в полубесконечные пространства // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2014. С. 360–364.

15. Пестерев И. С., Сосновский Н. Н., Степанов Б. Г. Расчетная модель сверхширокополосного гидроакустического преобразователя волноводного типа, излучающего в конусные полупространства // Материалы Всерос. откр. науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн». Муром, 2019. С. 561–570.

Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацыпура В.
 Т. Основы акустики. Киев: Наукова думка, 2007.

17. Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацыпура В. Т. Волновые задачи акустики. Киев: Интерсервис, 2013.

18. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графикой и таблицами. М.: Физматгиз, 1979.

19. Степанов Б. Г. Сопротивление излучения пьезоцилиндров преобразователя волноводного типа при излучении им в полубесконечные пространства // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 67–74.

I. S. Pesterev

State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC

B. G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University

GENERALIZED MODEL OF THE TRANSDUCER OF WAVEGUIDE TYPE. SYNTHESIS PROBLEM

The derivation of the transducer of waveguide type (TWT) radiation and excitation problem using the partial domain method is considered. TWT is formed by a coaxial set of water-filled piezocylinders with amplitude-phase excitation, which provides a mode of wideband radiation by a traveling wave through waterfilled apertures of the transducer into conical half-spaces adjacent to them, variable in aperture angle. The results of calculations of the frequency characteristics of sound pressure during radiation of TWT excited in accordance with the solution of the synthesis problem in the frontal and rear directions are presented and analyzed. The influence of the thickness of the passive flanges, which are used for the TWT layout in the antennas, is taken into account. A comparative assessment is given with the results of experimental studies. The influence of sound waves reflected from the TWT apertures on the radiation resistance of piezocylinders and on the electric voltages exciting them, depending on the magnitude of the aperture angle of conical half-spaces, is considered.

Broadband, transducer of waveguide type, synthesis problem solution, frequency response, radiation resistance

УДК 538.931

А. И. Мамыкин, М. Н. Шишкина Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Формирование структур пониженной размерности на энергетически неоднородной поверхности полупроницаемых мембран

Рассмотрены особенности строения адсорбционных слоев на энергетически неоднородной поверхности биологических мембран и полупроводниковых сенсоров. На основе фундаментальных термодинамических уравнений показано, что в процессе адсорбции на энергетически неоднородной поверхности формируется гетерогенный адсорбционный слой со свойствами двумерного газа, находящегося при постоянном поверхностном давлении, и координационно-насыщенной фазы, близкой по свойствам к адсорбционной пленке. Показано, что структура координационно-насыщенной фазы имеет фрактальный характер с размерностью Хаусдорфа 1 < H < 2, тогда как свойства двумерной газовой фазы позволяют рассматривать фазовый переход и формирование линии разрыва между поверхностными фазами как процесс роста кластера с фрактальной границей в процессе диффузии возбужденных частиц из двумерной газовой фазы. Диффузия на фрактальную границу формирующегося кластера рассмотрена с привлечением дробного оператора диффузии, в результате чего получено уравнение роста координационно-насыщенного кластера пониженной размерности. На основе получено уравнения разработаны принципы математического моделирования процессов переноса на энергетически неоднородной поверхности сенсоров (биологических мембран).

Адсорбция, клеточная мембрана, фазовый переход, диффузионный слой, координационно-насыщенный кластер, энергетически неоднородная поверхность, структуры пониженной размерности

Адсорбция из жидких и газовых сред в той или иной степени сопровождается процессами агрегации сорбирующихся частиц, особенно если эти частицы заряжены в связи с наличием ионов и свободных радикалов в окружающей среде или свободных носителей заряда в объеме и на поверхности адсорбента. Присутствие ионов и радикалов в окружающей среде характерно для процессов агрегации, протекающих в коллоидных системах, в частности при формировании противоионных кластеров на интегрированных белках плазмалеммы [1], [2] в биологических системах и биосенсорах. Кластеры, образующиеся при адсорбции на клеточную мембрану из жидкой среды организма, имеют различную морфологию в зависимости от адсорбционной способности активного центра на поверхности, а также от преобладающего типа агрегации: частица-кластер или кластер-кластер. С другой стороны, наличие свободных носителей заряда, например в полупроводниковых сенсорах, использующих пористые кристаллы, позволяет получать высокодисперсные структуры с энергетически неоднородной поверхностью, обладающие высокой адсорбционной способностью [3].

Свободные радикалы, в свою очередь, оказывают влияние как на характер агрегации частиц, так и непосредственно на топологию и энергетический рельеф поверхности адсорбента [4], [5]. Во всех случаях поверхностная агрегация формируется в процессе диффузии из приповерхностного пограничного слоя, существенно влияя на физические свойства сенсора [6], [7]. Энергетическая неоднородность адсорбирующей подложки и различие типов агрегации приводят к нарушению однородности диффузионного слоя в латеральном направлении, образуя неоднородности наномасштаба, которые, в свою очередь, способны формировать фрактальные структуры.

Энергетическая неоднородность поверхности пористого кристалла проявляется в том, что на гидрофобной поверхности полупроводника формируются активные центры в виде наноразмерных пор и образовавшихся в процессе обработки силановых и силоксановых групп, вокруг которых образуются агрегаты координационно-насыщенного по водородным связям и динамически координированного монослоев соответственно [3], [6], [8].

Энергетическая неоднородность поверхности клеточной мембраны обусловлена прежде всего различным строением противоионных аквакомплексов в зависимости от того, формируются ли они в виде кластеров вокруг отрицательно заряженных интегрированных белков или покрывают часть плазмалеммы с дефектами структуры билипидного слоя [1], [2]. Таким образом, характер поляризации плазмалеммы, а следовательно, форма и интенсивность потенциала действия на ней, существенно зависят от топологии и поверхностной концентрации интегрированных белков, а также от формы и расположения дефектных участков плазмалеммы [9], [10], определяя характерное поведение импульсов действия для эукариотических клеток различных органов, тканей и других составляющих биосистемы.

Рассмотрим детально процесс формирования равновесного координационно-насыщенного кластера на энергетически неоднородной поверхности сенсора или липидного бислоя эукариотической клетки, отметив при этом определенную изоморфность процессов, происходящих в обеих структурах [10], [11]. Основной механизм этих процессов по сути является поверхностным фазовым переходом $\{\omega\} \rightarrow \{\varepsilon\}$ в гетерогенном монослое [12], при котором достигается равновесие двух объемных фаз: адсорбент $\{\alpha\}$ и пограничная фаза диффузионного слоя $\{\beta\}$, и двух поверхностных фаз: координационно-насыщенный $\{\omega\}$ и динамически координированный $\{\varepsilon\}$ монослои.

В равновесном состоянии для внутренней энергии поверхностных фаз фундаментальное уравнение имеет вид

$$du = T \, ds + \sigma_{\omega} \, da_{\omega} + \sigma_{\varepsilon} \, da_{\varepsilon} + \chi \, dl \,, \qquad (1)$$

где T – температура поверхностного слоя; s – энтропия поверхностной фазы; a_{ε} – площадь динамически координированной фазы.

Равновесие поверхностных фаз определяется из условия минимума свободной энергии линии межфазного натяжения и поверхности адсорбированного кластера, для которых необходимо выполнение следующих условий, которые непосредственно следуют из уравнения (1):

$$l d\chi + \left(a_{\omega\chi} - a_{\varepsilon}^{(\chi)}\right) d\sigma_{\omega} + a_{\varepsilon}^{(\chi)} d\sigma_{\varepsilon} + s_{\omega\chi} dT - a_{\omega\chi} mD dj = 0$$
(2)

для линии межфазного натяжения и

$$(a_{\omega\varepsilon} - a_{\varepsilon})d\sigma_{\omega} + a_{\varepsilon} d\sigma_{\varepsilon} + s_{\omega\varepsilon}dT - a_{\omega\varepsilon}mD dj = 0$$
(3)

для поверхности адсорбированного кластера.

Оба уравнения записаны в переменных фазы $\{\omega\}$ (со стороны координационно-насыщенного кластера). Кривизна линии разрыва с учетом очевидного обстоятельства, что вогнутость линии располагается со стороны координационно-насыщенной фазы, учитывается выражением [12]

$$d\sigma_{0} = d\sigma_{\varepsilon} - \frac{d\chi}{r} + \frac{\chi}{r^2} dr.$$
 (4)

В (1)–(4) *l* – молярная длина линии разрыва поверхностных фаз; χ – линейное натяжение линии разрыва; $s_{\omega\varepsilon}$, $a_{\omega\varepsilon}$ – энтропийный и поверхностный молярные эффекты фазового обмена $\{\omega\} \rightarrow \{\varepsilon\}$; $s_{\omega\chi}$, $a_{\omega\chi}$ – соответствующие эффекты перехода из фазы $\{\omega\}$ на линию разрыва; a_{ω} – молярная площадь координационно-насыщенного кластера; $a_{e}^{(\chi)}$ – молярная площадь части линии разрыва, прилегающая к линии натяжения со стороны фазы $\{\omega\}; \sigma_{\omega}, \sigma_{\varepsilon}$ – поверхностные натяжения соответствующих фаз; r – радиус кривизны линии натяжения; D – коэффициент диффузии аквакомплекса из приграничного слоя; *т* – масса сорбируемого агрегата; ј – плотность потока диффузии из пограничного слоя. Для фазового обмена $\{\varepsilon\} \rightarrow \{\omega\}$ справедливы симметричные обозначения, так что соответствующие условия имеют вид

$$l d\chi + \left(a_{\varepsilon\chi} - a_{\varepsilon}^{(\chi)}\right) d\sigma_{\varepsilon} + a_{\varepsilon}^{(\chi)} d\sigma_{\omega} + s_{\varepsilon\chi} dT - a_{\varepsilon\chi} mD dj = 0;$$

 $(a_{\varepsilon\omega} - a_{\omega}) d\sigma_{\varepsilon} + a_{\omega} d\sigma_{\omega} + s_{\varepsilon\omega} dT - a_{\varepsilon\omega} mD dj = 0.$

Равновесие координационно-насыщенного кластера и диффузионного слоя внешней среды описывается соотношением

$$s_{\beta\omega} dT - a_{\beta\omega} mD dj + a_{\omega} d\sigma_{\omega} = 0; \qquad (5)$$

в переменных фазы $\{\omega\}$ для координационнонасыщенного кластера, а также в переменных фазы $\{\epsilon\}$ для динамически координированной адсорбции

$$s_{\beta\varepsilon} dT - a_{\beta\varepsilon} mD dj + a_{\beta\varepsilon} d\sigma_{\varepsilon} = 0.$$
 (6)

Индекс β в выражениях (5) и (6) обозначает фазу пограничного диффузионного слоя и определяет обмен частицами между фазами { β } и { ω }, { β } и { ϵ }. Рассматривая изотермический процесс формирования гетерогенного адсорбционного слоя на энергетически неоднородной поверхности мембраны, следует иметь в виду, что изменение площади поверхности динамически координированной фазы не влияет на интенсивность диффузионного потока из промежуточного слоя на поверхность плазмалеммы. Следовательно, приняв $d\sigma_{\varepsilon} = 0$, получим из уравнений (1) и (2) с учетом фазового обмена { ε } \rightarrow { ω } для межфазной границы в параметрах фазы { ω } уравнение, определяющее равновесие линии разрыва между поверхностными фазами гетерогенного слоя,

$$\lambda \chi = -\left(\frac{1}{2}a_{\omega\varepsilon} - a_{\omega\chi}\right)mD \,dj + \left(\frac{1}{2}a_{\omega\varepsilon} - \frac{1}{2}a_{\varepsilon} + a_{\varepsilon\chi} - a_{\omega\chi}\right)d\sigma_{\omega}.$$
 (7)

Из уравнений равновесия гетерогенной поверхностной фазы и граничного диффузионного слоя, взятых с учетом dT = 0, $d\sigma_{\varepsilon} = 0$, получим

$$(a_{\omega} - a_{\omega\varepsilon} + a_{\varepsilon})d\sigma_{\omega} = -(a_{\omega\beta} + a_{\omega\varepsilon} - a_{\varepsilon\beta})mD dj.$$

После подстановки в (5) уравнения (3) получаем уравнение в полных дифференциалах вида

$$-\frac{1}{r}(a_{\omega}-a_{\omega\varepsilon}+a_{\varepsilon})d\chi+\frac{\chi}{r^{2}}(a_{\omega}-a_{\omega\varepsilon}+a_{\varepsilon})dr-(a_{\varepsilon\beta}-a_{\omega\beta}-a_{\omega\varepsilon})mD\ dj=0.$$

С учетом симметричных соотношений вида $a_{ik} = a_k - a_i$ придем к окончательному уравнению состояния кластера координационно-насыщенного монослоя на энергетически неоднородной поверхности плазмалеммы

$$-\frac{2}{r}a_{\omega} d\chi + \frac{2\chi}{r^2}a_{\omega} dr - 2(a_{\omega} - a_{\varepsilon})mD dj = 0.$$

Из (7) следует, что адсорбция на энергетически неоднородной поверхности неизбежно формирует кластеры пониженной размерности, соотношение между площадью и средним радиусом которых характеризуется вариацией показателя степени у радиуса в пределах от 1 до 2.

Аналогичный вывод следует также из рассмотрения уравнения для свободной энергии координационно-насыщенного кластера, из которого может быть получено конкретное значение его фрактальной размерности. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma_{\omega} da_{\omega} + \chi_{\omega} dl_{\omega} = -T ds - mDj da_{\omega}$$

Таким образом, рост координационно-насыщенной фазы вокруг заряженного центра адсорбции биомембраны описывается степенной зависимостью между средним радиусом кластера и его площадью

$$a_{0} = \alpha r_0^H, \qquad (8)$$

где α – форм-фактор, являющийся константой, которая определяется геометрией рассматриваемой фигуры, *H* варьируется в пределах от 1 до 2, будучи, по сути, размерностью Хаусдорфа [13]. Выражение (8) вполне согласуется с экспериментально наблюдаемой закономерностью изменения интегральной интенсивности широкой компоненты спектра ЯМР в гидратированном пористом кристалле, связывающее рост площади координационно-насыщенной адсорбированной фазы с изменением влажности [6]. Соответствующее выражение в актуальных обозначениях имеет вид

$$a_{\omega} = a_{\omega s} \left(h - h_s \right)^H ,$$

где h – влажность среды; h_s – критическая влажность, соответствующая насыщению наноразмерных пор; $H = 1.56 \pm 0.24$ – экспериментально измеренная размерность Хаусдорфа. Тем самым демонстрируется определенная изоморфность процессов адсорбции в плазмалемме и пористой структуре, объединяющий фактор в которой – энергетическая неоднородность адсорбционных центров на гидрофобной поверхности адсорбента.

Степенной закон роста координационно-насыщенного кластера характерен для различных процессов и, вообще говоря, описывает диффузию возбужденных частиц из некоторой области пространства к границам, где частицы теряют свою активность. В данном случае при неизменном потоке частиц из пограничного слоя к поверхности мембраны диффузия сорбированных частиц к границе раздела поверхностных фаз относится к той же категории явлений. Предполагается, что в наблюдаемых степенных закономерностях фундаментальную роль играет геометрия среды [14].

Фаза динамически координированного слоя – это, по сути, двумерный газ с центрами конденсации вокруг дефектов жидкокристаллической матрицы. Аналогичная структура адсорбированной фазы формируется на поверхности пористого кристалла, где основными центрами адсорбции являются наноразмерные поры, а расположенные случайным образом силановые и силоксановые группы, адсорбция на которых слабее, также иг-

рают роль центров конденсации двумерного газа. Поэтому динамически координированную поверхностную фазу можно также описывать в терминах поверхностного давления (заменив σ_{ε} на $-\pi$) в условиях изобарного процесса (ранее показано, что $d\sigma_{\varepsilon} = 0$).

Процесс роста кластера с фрактальной границей описывается обобщенным уравнением диффузии, в которое в данном случае включен оператор дробной производной [15]. Для кластера достаточно больших размеров (имеется в виду, что средний радиус кластера превышает диффузионную длину сорбированных частиц) в рассматриваемом случае проблема диффузии к самоподобным границам отображается следующим соотношением

$$j_{\varepsilon\chi f}(\rho, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(D_{\varepsilon f}(t) \frac{\partial C_{\varepsilon}(\rho, t)}{\partial \rho} \right) \right]$$

где $j_{\varepsilon\chi f}(\rho, t)$ – плотность потока из двумерной газовой фазы на границу раздела; $D_{\varepsilon f}(t)$ – зависящий в общем случае от времени коэффициент диффузии; $C(\rho, t)$ – поверхностная концентрация двумерного газа; ρ – радиальная координата, направленная к центру адсорбциии. Для изобарного состояния динамически координированного слоя коэффициент диффузии (в данном случае – дробный оператор диффузии) не зависит явно от времени, поэтому для плотности потока диффузии на единицу длины линии разрыва получаем

$$j_{\varepsilon\chi f}(\rho, t) = D_{\varepsilon} \frac{\partial C_{\varepsilon}(\rho, t)}{\partial \rho},$$

где $C_{\varepsilon}(\rho, t)$ полагаем постоянным везде, кроме реактивного слоя вблизи линии разрыва между фазами. На линии разрыва, где сорбированные частицы теряют активность, получаем граничное условие $C_{\varepsilon}(\rho, t) = 0$. Соответствие между процессами диффузии на фрактальную и гладкую границу может быть выражено как

$$lj_{\varepsilon\chi f} = l_f j_{\varepsilon\chi},$$

где $j_{\epsilon\chi}$ – диффузионый поток на гладкую границу, который выражается законом Фика; $j_{\epsilon\chi f}$ – соответствующий поток на границу фрактального кластера; l и l_f – длины гладкой и фрактальной границ раздела фаз соответственно.

Периметр *l* кластера с гладкой границей пропорционален его радиусу, площадь a_{ω} кластера со средним радиусом r_0 пропорциональна r_0^2 а площадь $a_{\omega f}$ и периметр l_f фрактального кластера подобного размера выражаются соотношениями [16]

$$a_{\omega f} = r_0^H \xi^{2-H}, \qquad (9)$$
$$l_f = r_0^H \xi^{1-H},$$

где ξ – произвольная длина отсчета для измерения площади и периметра координационнонасыщенного кластера; *H* – фрактальная размерность границы. Для диффузионного процесса натуральной длиной отсчета служит толщина пограничного слоя диффузионного профиля

$$\xi = k \sqrt{D_{\varepsilon} \tau}, \qquad (10)$$

где k – безразмерная константа и D_{ε} – коэффициент поверхностной диффузии в фазе динамически координированного слоя; τ – среднее время свободного пробега. В дальнейшем, учитывая постоянство поверхностного давления по всей площади координационно-насыщенной фазы, полагаем k = 1.

Подстановка (10) в (9) выражает явную реактивную область фрактальной границы как функцию времени *t*

$$l_f(t) = k^{1-H} r_0^H(t) D_{\varepsilon}^{(1-H)/2} \tau^{(1-H)/2}.$$

Полагая линию разрыва замкнутой, получаем для роста площади координационно-насыщенного кластера

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C_{\omega} a_{\omega f} \right) = l_f D_{\varepsilon} \frac{\partial C_{\varepsilon}(\rho, t)}{\partial \rho}$$

или, после упрощения, с учетом (22) и (21)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C_{\omega} a_{\omega f} \right) = k^{-H} r_0^H \left(t \right) D_{\varepsilon}^{1-H/2} C_{\varepsilon} \tau^{-H/2} , \quad (11)$$

где $D_{\varepsilon}^{1-H/2}$ следует трактовать, как дробный оператор диффузии $D_{\varepsilon f}$.

Таким образом, диффузия сорбированных частиц на фрактальную границу кластера удовлетворяет уравнению, в котором коэффициент диффузии в динамически координированной фазе D_{ε} заменяется дробным оператором диффузии $D_{\varepsilon f}$.

На основе (11) можно построить модель роста поверхностного кластера, которая учитывает

фрактальные свойства его периметра. Для этого заменим плотность частиц в каждой области пропорциональной ей величиной – поверхностным давлением π , или поверхностным натяжением σ , а также используем уравнение (4). Таким образом,

$$a_{\omega f} \frac{\partial \sigma_{\omega}}{\partial t} + \sigma_{\omega} \frac{\partial a_{\omega f}}{\partial t} = k^{-H} r_0^H (t) D_{\varepsilon}^{1-H/2} \sigma_{\varepsilon} \tau^{-H/2}$$

или, после подстановки (4) с учетом изобарного характера динамически координированной фазы,

$$\sigma_{\omega} \frac{\partial a_{\omega f}}{\partial t} = k^{-H} r_{0}^{H}(t) D_{\varepsilon}^{1-H/2} \sigma_{\varepsilon} \tau^{-H/2} - a_{\omega f} \left(-\frac{1}{r_{0}(t)} \frac{\partial \chi}{\partial r} \frac{\partial r_{0}}{\partial t} + \chi \frac{1}{r_{0}^{2}(t)} \frac{\partial r_{0}}{\partial t} \right).$$
(12)

В конечно-разностном представлении (12) позволяет определить скорость роста границы и площади координационно-насыщенного кластера и время установления динамического равновесия. Результаты моделирования существенно зависят от геометрии расположения центров адсорбции на моделируемой поверхности и фрактального рельефа периметра, в котором неизбежно присутствуют участки с кривизной разного знака, в том числе в виде участков, вогнутых в сторону динамически координированной фазы, с которых происходит существенное испарение частиц. Тем самым неизбежно формируется рыхлый кластер,

1. Геннис Р. Биомембраны. Молекулярная структура и функции / пер. с англ. М.: Мир. 1997.

2. Мамыкин А. И., Листов М. В., Рассадина А. А. Спектроскопия особенностей переноса электрона свободными радикалами в норме и патологии // Вестн. новых медицинских технологий. Электрон. изд. 2017. Т. 11, № 2. С. 259–266.

3. Механизмы роста и структура адсорбционного слоя воды на поверхности пористого кремния / Д. П. Власюк, А. И. Мамыкин, В. А. Мошников, Е. Н. Муратова // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41, № 5. С. 745–752.

4. Листов М. В., Мамыкин А. И. Экспериментальная модель оксидативного стресса при хроническом нарушении баланса радикалов в биосистеме: полимиозитформы Вагнера–Унферрихта // Вестн. Рос. воен.-мед. акад. 2018. № 4 (64). С. 117–122.

5. Листов М. В., Мамыкин А. И. Формирование пористой структуры в жидкокристаллической матрице клеточной оболочки в процессе одноэлектронного переноса свободными радикалами // Клиническая патофизиология. 2014. № 1. С. 74–76. т. е. скорость роста площади координационнонасыщенного кластера ограничивается образованием в массиве координационно-насыщенной фазы дефектных участков, которые одновременно увеличивают скорость роста границы кластера. Задавая распределение неоднородных по энергии адсорбционных центров, например с гауссовым спадом энергии от центра адсорбции, следует ожидать появления подобных дефектов по изоэнергетическим линиям на поверхности сенсора.

Формирование фрактального кластера происходит следующим образом. Для заданного распределения центров адсорбции кластер растет как плотная структура до тех пор, пока средний радиус сформировавшегося кластера не становится равным ширине ξ пограничного слоя диффузионного профиля или пока граница кластера не достигнет изоэнергетической линии. Дальнейшее развитие кластера представляет собой протекание нескольких конкурирующих процессов.

В результате формируется фрактальная структура, масса и форма которой существенным образом определяются выбором геометрии и энергетики адсорбционных центров. При этом следует отметить, что сформировавшийся равновесный кластер представляет собой динамическую структуру, которая при детальном равновесии поглощения и испарения способна изменять форму и размерность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. Исследование поверхностных аквакомплексов в пористых кристаллах методом ядерного магнитного резонанса / А. И. Мамыкин, М. Н. Малышев, В. И. Марголин, В. А. Тупик // Нанотехника. 2009. № 1 (17). С. 99–103.

7. Листов М. В., Мамыкин А. И. Концентрация свободных радикалов в организме млекопитающих в условиях изменения активности супероксидгенерирующей и антиоксидантной систем // Вестн. Рос. воен.-мед. акад. 2014. № 1 (45). С. 121–126.

8. Мамыкин А. И., Мошников В. А., Ильин А. Ю. Магнитно-резонансная спектроскопия пористых квантово-размерных структур // ФТП. 1998. Т. 29, № 10. С. 356–358.

9. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела / пер. с англ. М. Мир, 1980.

10. Mamykin A., Listov M., Rassadina A. Sensor properties of cellular membrane // Sensorica 2017. IEEE Workshop Industrial and Medical Measurement and Sensor Technology. 2017. № 2. P. 60–61.

11. Мамыкин А. И., Вяткин В. М., Сердюк А. С. Радиоспектроскопия двойного электрического слоя на поверхности пористого кремния // 54-я Науч.-техн. конф. НТОРЭС им. А. С. Попова. СПб., 1999. С. 25.

12. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л.: Химия, 1967.

13. Соколов И. М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания // УФН. 1986. Т. 150, № 2. С. 221–255. 14. Зельдович Я. Б., Соколов Д. Д. Фрактали, подобие, промежуточная асимптотика // УФН. 1985. Т. 146, № 3. С. 493–506.

15. Miller K. S., Ross B. An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations. New York: Wiley, 1993.

16. Mandelbrot B. B. Les objects fractals: Forme, hazard et dimension. Paris, 1975.

A. I. Mamykin, M. N. Shishkina Saint Petersburg Electrotechnical University

LOW DIMENSIONAL STRUCTURES FORMATION ON ENERGETICALLY INHOMOGENEOUS SURFACE OF SEMIPERMEABLE MEMBRANES

The features of the structure of adsorption layers on the energetically inhomogeneous surface of biological membranes and semiconductor sensors are considered. On the basis of fundamental thermodynamic equations, it is shown that in the process of adsorption on an energetically inhomogeneous surface, a heterogeneous adsorption layer with the properties of a two-dimensional gas under constant surface pressure and a coordinatively saturated phase close in properties to the adsorption film are formed. It is shown that the structure of the coordination saturated phase has a fractal character with Hausdorff dimension 1 < H < 2, whereas the properties of the two-dimensional gas phase allow us to consider the phase transition and the formation of the gap line between the surface phases as a process of cluster growth with a fractal boundary in the process of diffusion of excited particles from the two-dimensional gas phase. Diffusion to the fractal boundary of the forming cluster is considered using the fractional diffusion operator, as a result of which the growth equation of a coordinatively saturated cluster of reduced dimension is obtained. On the basis of the obtained equation, the principles of mathematical modeling of transfer processes on the energetically inhomogeneous surface of sensors or biological membranes are developed.

Adsorption, cell membrane, phase transition, diffusion layer, coordinatively saturated cluster, energetically inhomogeneous surface, low dimensional structures



Информатика, вычислительная техника и управление !

УДК 504.4.054, 504.064.3

Н. И. Куракина, Р. А. Мышко Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

ГИС моделирования нефтяных разливов на магистральных трубопроводах

Исследованы свойства и поведение нефтяных разливов при авариях на магистральных нефтепроводах. Проведен анализ основных этапов разлива нефти на суше, осуществлена оценка суммарного количества нефти, вылившейся из трубопровода, и факторов, влияющих на начальные объемы нефтяных разливов. Рассмотрены существующие методы моделирования распространения нефтяных разливов с учетом рельефа; разработан комбинированный алгоритм расчета конфигурации нефтяного загрязнения с последующей программной реализацией в виде скрипта на языке Python и отображением результатов на тематических картах в ГИС ArcGIS for Desktop. Исследованы вопросы влияния испарения и фильтрации нефти на конфигурацию разлива и оценена адекватность модели. В качестве примера моделирования выбраны возможные аварийные разливы нефти на магистральных нефтепроводах республики Башкортостан, так как республика Башкортостан является одним из наиболее значимых нефтедобывающих регионов России. Результаты работы алгоритма и реализованная программа могут применяться для выявления наиболее опасных участков нефтепровода, определения наиболее вероятных направлений распространения аварийных разливов в чрезвычайных ситуациях с целью их предотвращения и оптимизации работ по ликвидации последствий.

Математическое моделирование, разливы нефти, нефтепродукты, геоинформационные системы, анализ, ArcGIS for Desktop

В процессе экономической деятельности людей неотъемлемым является использование углеводородов, в частности нефти и газа. Производство большей части используемых на данный момент видов топлива предполагает переработку больших объемов нефти, что в свою очередь вызывает необходимость совершенствования систем транспортировки сырой нефти и нефтепродуктов. Наиболее эффективный метод транспортировки нефти и нефтепродуктов на данный момент – магистральный трубопроводный транспорт. С учетом возрастающих объемов добычи, транспортировки и переработки нефти актуален вопрос безопасности проводимых технологических процессов, в частности для России – одного из мировых лидеров по добыче нефтепродуктов.

Аварийные ситуации, связанные с транспортировкой нефти, наносят не только экономический ущерб из-за потери ресурса, но и серьезный экологический ущерб. Попадание нефти и нефтепродуктов в почву делает ее непригодной для хозяйственной деятельности, губительно влияет на растения, животных и микроорганизмы. Рекультивация загрязненных земель – трудоемкий и затратный процесс, в некоторых случаях осложняемый неоднородным растительным покровом, грунтами с высокой нефтеемкостью, крутым рельефом или обилием твердых пород, не позволяющих производить рекультивацию. При попадании разлившейся нефти в водоемы загрязнение распространяется на большие расстояния вследствие диффузионных процессов.

Целью данной публикации является анализ существующих методов прогнозирования аварийных разливов нефти на суше, разработка комбинированного алгоритма расчета конфигурации нефтяного загрязнения с последующим трехмерным моделированием аварийных разливов нефти на магистральных нефтепроводах на языке Python и отображением результатов в ГИС ArcGIS for Desktop.

В качестве объекта исследования выбраны магистральные нефтепроводы Республики Башкортостан. Урало-Сибирский регион, в частности Республика Башкортостан, относится к наиболее значимым нефтедобывающим регионам России. В 2008 г. в республике на трубопроводный транспорт приходилось 70.5 % грузооборота. По состоянию на октябрь 2015 г. протяженность нефтепроводов и нефтепродуктопроводов составляет порядка 5000 км [1]. В рассматриваемом регионе случались прецеденты аварийных ситуаций, связанных с нефтепроводами. Например, 3 июня 1989 г. около деревни Улу-Теляк (Башкортостан) произошел разрыв трубы продуктопровода, и свыше 4 тыс. т углеводородной смеси заполнило долину вдоль полотна железной дороги Аша-Уфа [2]. Важность предотвращения подобных аварий подчеркивает необходимость разработки дополнительных инструментов прогнозирования аварийных ситуаций.

Аварийные разливы нефти на магистральных трубопроводах. В России 99 % нефти транспортируется посредством нефтепроводов. Нефтепроводы представляют собой комплексы сооружений для транспортировки нефти и продуктов ее переработки от места их добычи или производства к пунктам потребления или перевалки.

Скорость движения нефти в трубопроводе составляет 10...12 км/ч. К частям нефтепроводов, наиболее подверженным механическим повреждениям, относятся клапаны, фитинги трубопровода, насосные станции, а в особенности прокладки, сальники и фланцы [3].

При нарушении целостности трубопровода выделяются следующие стадии аварийного истечения нефти:

 Стадия «напорного» истечения, происходящая от момента аварии до момента отключения перекачивающей станции. Эта стадия характеризует истечение нефти (или нефтепродукта) через образовавшееся отверстие при работе перекачивающей станции. Как правило, в этот период давление в месте аварии незначительно меняется во времени, и количество вытекшей жидкости можно определить исходя из разности давлений снаружи и внутри трубопровода в месте аварии, площади отверстия и продолжительности истечения.

2. Стадия «безнапорного» истечения после отключения перекачивающей станции до перекрытия линейных задвижек, изолирующих поврежденный участок от остальной части трубопровода.

3. Стадия безнапорного истечения от перекрытия линейных задвижек до ликвидации аварии (или полного опорожнения трубопровода).

Во второй и третьей стадиях жидкость вытекает через отверстие под действием силы тяжести. При этом в наивысших точках трубопровода последовательно, один за другим, происходят разрывы плотности потока, и в этих местах образуются полости, заполняемые насыщенными парами нефти (или нефтепродуктов), в которых давление равно упругости паров нефти.

Процесс истечения заканчивается либо тогда, когда авария ликвидируется (восстанавливается герметичность трубопровода), либо когда прекращается вытекание нефти из отверстия. Это происходит, когда давление внутри трубы в месте аварии выравнивается с атмосферным.

Для расчета суммарного количества нефти, вылившейся из трубопровода, выделяются три этапа, которые характеризуются разными режимами истечения и соответствуют обозначенным стадиям [4].

Объем V_1 нефти, вытекшей из нефтепровода с момента T_a возникновения аварии до момента T_o остановки перекачки, определяется соотношением

$$V_1 = Q_1 T_1 = Q_1 (T_0 - T_a),$$

где Q_1 – расход нефти через место повреждения с момента возникновения аварии до остановки перекачки, м³/ч. Время повреждения T_a и остановки T_o насосов фиксируется системой автоматического контроля режимов перекачки.

Расход нефти через место повреждения *Q*₁ определяется из выражения

$$\begin{split} Q_{l} = Q' - Q_{0} \times \\ \times \left\{ \frac{1}{\left(l - x^{*}\right)^{\left[Z_{1} - Z_{2} + \frac{(P' - P'')}{pg} - i_{0}x^{*}\left(\frac{Q'}{Q_{0}}\right)(2 - m_{0})\right]}}{i_{0}} \right\} \times \\ \times \left(\frac{1}{2} - m_{0}\right), \end{split}$$

где Q_0 – расход нефти в исправном нефтепроводе при работающих насосных станциях, м³/ч; *l* – протяженность участка нефтепровода, заключенного между двумя насосными станциями, м; m_0 – показатель режима движения нефти по нефтепро-

воду в исправном состоянии; i_0 – гидравлический уклон при перекачке нефти по исправному нефтепроводу; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Расход нефти в исправном нефтепроводе при работающих насосных станциях Q_0 определяется режимом загрузки нефтепровода и фиксируется по показаниям приборов на нефтеперекачивающих станциях (НПС). Протяженность поврежденного участка нефтепровода, заключенного между двумя НПС, протяженность участка нефтепровода от НПС до места повреждения x^* , геодезические отметки начала Z_1 и конца Z_2 участка определяются по профилю трассы нефтепровода. Расход Q', давление в начале P' и в конце P'' участка в поврежденном нефтепроводе при работающих НПС определяются по показаниям приборов на НПС на момент аварии [4].

На основании вышеизложенной методики были определены потенциальные объемы нефти, выливающиеся из нефтепровода при аварии.

Анализ методов моделирования нефтяных разливов. В ходе работы были рассмотрены основные существующие методы моделирования аварийных разливов нефти на суше. С учетом значительной протяженности нефтепроводов методы базируются на использовании геоинформационных систем. Основные подходы к решению задачи моделирования распространения нефти по рельефу.

Аппроксимация уравнения неразрывности методом конечных разностей. Для общей оценки характеристик поверхностного стока нефти может быть использована модель, предложенная в статье В. Г. Гитиса, Е. Н. Петрова и др. [4].

Жидкость, находящаяся в неравновесном состоянии, стремится выровнять свой поверхностный уровень под действием силы тяжести и гидростатического давления. Для описания движения потока жидкости при отсутствии внешних источников используется дифференциальная форма уравнения неразрывности несжимаемой жидкости

$$\operatorname{div}(\mathbf{j}) = -\frac{\partial h}{\partial t}$$
,

где div(**j**) = $\partial j_x / \partial x + \partial j_y / \partial y$; **j** – вектор потока жидкости, значение которого равно объему воды, протекающему за единицу времени через прямоугольную площадку; направление потока **j** = $\lambda \upsilon$ совпадает с направлением скорости движения жидкости *v* [4].

Численное решение уравнения, основанное на разностной аппроксимации правой его части, и наложение на рассматриваемую территорию сетки с квадратной ячейкой позволяют последовательно вычислить конфигурации поля H = H(x, y, t) для дискретных точек пространственно-временной сетки:

$$\begin{split} H_{x,y}(t+\tau) &= H_{x,y}(t) - \frac{\tau\lambda\rho g}{md^2} \times \\ & \left[\min\left(d\left|\nabla H_{x,y}\right|, \frac{cdm}{\lambda\rho g}h_{x+1,y}\right) \frac{H_{x+1,y} - H_{x,y}}{d\left|\nabla H_{x+1,y}\right|} \right] \\ &+ \left[\min\left(d\left|\nabla H_{x,y}\right|, \frac{cdm}{\lambda\rho g}h_{x-1,y}\right) \frac{H_{x-1,y} - H_{x,y}}{d\left|\nabla H_{x-1,y}\right|} \right] \\ &+ \left[\min\left(d\left|\nabla H_{x,y}\right|, \frac{cdm}{\lambda\rho g}h_{x,y+1}\right) \frac{H_{x,y+1} - H_{x,y}}{d\left|\nabla H_{x,y+1}\right|} \right] \\ &+ \left[\min\left(d\left|\nabla H_{x,y}\right|, \frac{cdm}{\lambda\rho g}h_{x,y-1}\right) \frac{H_{x,y-1} - H_{x,y}}{d\left|\nabla H_{x,y-1}\right|} \right] \end{split}$$

где τ – шаг времени; λ – высота движимого слоя жидкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; m – некоторый коэффициент пропорциональности; d – шаг сетки; c – средняя скорость потока.

К недостаткам данной модели относятся необходимость дополнительного учета фильтрации жидкости в грунт и испарения, а также, экспериментально подтвержденная необходимость равномерного покрытия поверхности некоторым слоем жидкости для правильной работы алгоритма, что не предполагается в исследуемой задаче, а оптимизация сильно усложняет алгоритм.

Метод моделирования, основанный на решении однокоординатных уравнений вдоль известных направлений стока. Согласно этому методу определяются русло потока жидкости и аккумулирующая способность элементов модели рельефа.

Динамическая ось потока (русло потока) определяется методом градиентного спуска для каждой расчетной точки матрицы рельефа. Ширина русла потока жидкости зависит как от интенсивности аварийного выброса, времени истечения и реологических свойств жидкости, так и от гидравлического уклона местности, сорбционных свойств почвы (грунта). Неустановившееся движение жидкости по рельефу местности описывается уравнением неразрывности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho_{\mathcal{K}} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dx + \frac{\partial h_{\Phi}}{\partial t} n_e \rho_{\Gamma \mathrm{p}} + q_{\mathcal{U} \mathrm{C} \mathrm{II}} = 0,$$

где $\rho_{\rm ж}$, $\rho_{\rm rp}$ – плотности жидкости и грунта, кг/м³; $h_{\rm \varphi}$ – глубина фильтрации жидкости в грунт (почву), определяемая по уравнению диффузии; n_e – нефтеемкость грунта, м³/м²; $q_{\rm исп}$ – интенсивность испарения вещества с поверхности, кг/(м²c), определяемая в соответствии с методологией, изложенной в [5]; 9 – скорость течения жидкости в направлении динамической оси потока (в русле потока), определяемая по уравнению Шези:

$$\vartheta = C \sqrt{R_{\Gamma} i},$$

где C – коэффициент Шези, зависящий от свойств поверхности грунта, R_{Γ} – гидравлический радиус потока жидкости, определяющий ширину русла потока, м, *i* – гидравлический уклон рельефа местности [5].

Недостаток данной модели заключается в необходимости дополнительных данных – линий максимальных градиентов и изолиний рельефа, а также в необходимости определения гидрологических характеристик потока. Преимущество модели – в том, что в ней учитываются фильтрация в грунт и испарение.

Использование встроенных инструментов среды ArcGIS. К решению задачи также можно подойти с точки зрения использования встроенных инструментов ArcGIS for Desktop. Модуль Spatial Analyst предлагает инструменты гидрологии, позволяющие определить направления стока.

В ArcGIS for Desktop реализован алгоритм направления стока Deterministic Eight Neighbor (D8) [6]. В соответствии с ним поток из рассматриваемой ячейки целиком направляется в ту из восьми соседних, которая имеет, во-первых, меньшую высоту и, во-вторых, наибольший уклон линии, соединяющей центр ячейки с центром соседней. Выходные данные инструмента «Направление стока» представлены целочисленным растром, значения которого находятся в диапазоне от 1 до 255.

На основе растра направления потока формируется растр суммарного стока (инструмент «Суммарный сток», Flow Accumulation), каждая ячейка которого определяется как сумма весов для всех ячеек, которые стекают в каждую ячейку, расположенную вниз по склону.

Суммарный сток основывается на количестве ячеек, из которых осуществляется сток в каждую конкретную ячейку в выходном растре. Ячейка, которая обрабатывается в текущий момент времени, не учитывается в сумме. Выходные ячейки

.....

с высоким суммарным стоком – это участки концентрированного стока; они могут быть использованы для определения русел водотоков. Выходные ячейки с суммарным стоком, равным нулю, – это локальные топографические пики; они могут быть использованы для выделения хребтов или линий водораздела. Русло потока жидкости выделяется посредством задания порогового значения водосборной площади.

Недостаток такого метода в контексте настоящего исследования заключается, прежде всего, в его глобальности, – он более применим для оценки гидрологических характеристик речной сети. В то же время, выходные данные характеризуют установившийся режим движения жидкости, в случае нефтяного разлива речь идет о неустановившемся режиме, что и представляет наибольшие трудности при моделировании.

Рассмотренные методы моделирования имеют свои преимущества и недостатки. Специфика аварийных разливов, состоящая в том, что поведение растекающейся жидкости, наряду с ее свойствами и действием закона тяготения, будет обусловлено рельефом, составом грунтов, климатическими условиями, требует разработки комплексного алгоритма.

Комбинированный алгоритм моделирования аварийных разливов нефти. Целью исследования служит построение алгоритма, оптимального с точки зрения минимизации времени обработки данных, с математической моделью, учитывающей условия местности (рельеф, наличие естественных и искусственных сооружений), а также такие процессы, происходящие с нефтью, как испарение и фильтрация в почву.

С использованием доступных данных в ArcGIS Desktop реализована карта основных направлений нефтепроводов Республики Башкортостан (рис. 1), служащих потенциальными источниками нефтяного загрязнения.



Исходными данными алгоритма моделирования служат геоданные, представляющие собой сетку высот рельефа местности, в соответствии с которой нужно моделировать нефтяной разлив [7]. Также к исходным данным относится объем разлива, его координаты, дополнительные характеристики (плотность нефти, коэффициент нефтеемкости грунта).

Результирующие данные представлены конфигурацией нефтяного разлива, отражающей распределение объемов нефти в ячейках растра и позволяющей наглядно отобразить результаты на карте. Такая модель может быть применена для быстрой оценки потенциально опасных участков при аварийном разливе нефти.

Для построения трехмерной модели рельефа использованы результаты спутниковой радиометрии теплового излучения и отражения ASTER GDEM 2, представляющие собой сетку высотных отметок с шагом 30×30 м [8]. Алгоритм также может быть применен к другим данным, однако следует учитывать, что размер ребра сетки будет влиять на точность получаемого результата.

При построении комбинированного алгоритма за основу моделирования нефтяного разлива взят алгоритм D8, который используется в инструментах гидрологии Spatial Analyst, однако в соответствии с поставленной задачей моделирование ведется относительно заранее известных координат разлива с заранее известным объемом вылившейся нефти.

Предположим, что аварийный разлив занимает одну ячейку растра высот. Для соседних 8 ячеек находим разницу высот центральной ячейки с соседними с учетом уровня жидкости. Если высота соседней ячейки больше, то жидкость в данном направлении не течет; для остальных ячеек находим сумму разностей и определяем коэффициенты уклона для всех соседних ячеек. В соответствии с найденными коэффициентами распределяем некоторый элементарный объем жидкости. Таким образом, от рассматриваемой ячейки отнимаем этот элементарный объем:

$$h_0(t+\tau) = h_0(t) - \Delta h. \tag{1}$$

К соседним восьми ячейкам прибавляем ту часть этого объема, которая соответствует крутизне склона в данном направлении:

$$h_{k} = h_{k} + \frac{\Delta h (H_{0} - H_{k})}{\sum_{k=1}^{8} (H_{0} - H_{k})},$$
(2)

где $H_0 - H_k > 0$. При нулевом или отрицательном значении крутизны эта разность принимается равной нулю.

.....

Заданный объем преобразуем в единицы высоты (уровня) жидкости для более удобной реализации алгоритма в соответствии с используемым размером сетки растра высот:

$$h_0 = \frac{V}{d^2},\tag{3}$$

где *V* – заданный объем разлива; *d* – шаг сетки.

Элементарный объем жидкости Δh , вытекающий из ячейки за единицу времени, зависит от плотности нефти, ускорения свободного падения, ребра ячейки и некоторого значения λ , характеризующего высоту слоя жидкости, которую предполагаем движимой. В то же время эта величина характеризует минимальную высоту уровня жидкости на поверхности грунта, при достижении которой можно считать, что дальнейшего растекания нефти не будет происходить:

$$\Delta h = \frac{\rho_{\rm H} g \lambda}{d^2} \,. \tag{4}$$

Экспериментально подтверждено, что эта величина должна быть много меньше начального уровня жидкости в ячейке, где произошел разлив [4]. Исходя из значения λ и объема вылитой нефти определяется предполагаемое время моделирования, так, чтобы нефть перешла в равновесное состояние и высота ее уровня нигде не превышала λ (за исключением локальных понижений, которые могут аккумулировать нефть).

Для более наглядного представления результирующей конфигурации разлива полученное распределение уровней жидкости в ячейках суммируется со значениями высот и результатом становится распределение абсолютных высот уровня жидкости.

Явление просачивания нефти в почву учитывается методом умножения объемов нефти на заданный коэффициент нефтеемкости грунта. Объем впитавшейся нефти зависит от площади конечной конфигурации разлива и средней глубины пропитывания. Для рассмотренного примера, анализируя карту почв, можно определить коэффициент нефтеемкости грунта как 0.4 (суглинистый грунт), средняя глубина пропитки земли нефтью – 0.05 м.

Таким образом, формируется следующий алгоритм моделирования:

 На вход принимается набор растровых данных, соответствующих высотам местности, координаты предполагаемого места аварии нефтепровода и объем вылившейся нефти.

2. С целью экономии вычислительных ресурсов массив ограничивается квадратной областью, охватывающей предполагаемую площадь разлива с центром в точке разлива; в случае необходимости (при больших объемах разлива или сложном характере рельефа) эта площадь может быть увеличена.

3. Набор растровых данных преобразуется в массив для дальнейшей обработки.

4. Определяется начальная высота уровня жидкости в точке разлива, полученная из объема разлива и площади элементарной ячейки согласно (3).

5. Определяется скорость истечения нефти за элементарный интервал времени из ячейки, выраженная в единицах изменения высоты уровня жидкости по формуле (4).

6. В соответствии с заданным временем моделирования реализуется алгоритм D8, вычисляется конфигурация разлива с использованием выражений (1), (2). Время моделирования носит



условный характер и может не соответствовать реальному времени распространения нефти, оно лишь характеризует количество итераций алгоритма и должно быть выбрано достаточно большим, чтобы жидкость перешла в равновесное состояние, – тогда конфигурация поля растекания может считаться конечной (с допущением минимального движимого слоя).

7. Суммируются массив с уровнями жидкости *h* и массив высот *R* для более наглядного представления результата.

 Рассчитывается объем нефти, впитавшейся в грунт, в соответствии с заданным коэффициентом нефтеемкости грунта и площадью конфигурации разлива.

9. Полученный массив данных, характеризующий распределение абсолютных уровней жидкости в элементах рельефа, конвертируется в набор растровых данных

10. Полученный набор растровых данных импортируется в ArcGIS для дальнейшей визуализации.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Для программной реализации алгоритма использовался язык программирования Python. Среда ArcGIS предполагает использование данного языка для разработки дополнительных модулей скриптов. Реализован скрипт, применяемый к растровым данным ArcGIS (интерфейс скрипта в ArcGIS – на рис. 3). Для корректной работы скрипта необходимо настроить параметры геообработки соответствующим образом: разрешить

.....

перезапись данных, установить экстент геообработки таким образом, чтобы он охватывал местность предполагаемого разлива нефти.

В интерфейсе скрипта задаются следующие параметры:

– inRaster – входной набор растровых данных высот;

 – SplitX, SplitY – координаты предполагаемого места разлива в десятичных градусах;

– ClipRate – показатель, определяющий область растра в окрестности координат разлива, которая будет использована для расчета (определяет долю входного растра, может принимать значения от 0 до 1). Чем меньше этот показатель, тем быстрее производится расчет, однако площадь не должна быть меньше предполагаемой области разлива;

- Time - количество итераций алгоритма;

– Volume – общий объем нефти, вытекшей при аварии из нефтепровода, м³;

 – OilDensity – плотность нефти, по умолчанию 855 кг/м³;

– Lambda – толщина верхнего слоя нефти, которая считается движимой при моделировании.
 Уменьшение этого параметра требует соответствующего увеличения параметра time и должно быть мало по сравнению с начальной высотой разлива;

– Кп – коэффициент нефтеемкости грунта, м³/м², определяемый по таблице; если учета фильтрации нефти в грунт не требуется, оставить пустым.

.....

nRaster	OilSplit
C:\Users\Asus\Desktop\Bashkiriya\Oil.gdb\Aster_GDEM	enepiit
splitX (coordinate)	Определение
54.942610	площади,
splitY (coordinate)	загрязнённой нефтью
53.499438	при аварийном
ClipRate (дополнительно)	разливе
#	
ime (s)	
500	
volume (m^3)	
1712	
pilDensity (kg/m^3) (дополнительно)	
855	
ambda (m) (дополнительно)	
0.01	
(п (дополнительно)	
0.4	
putRaster	
C:\Users\Asus\Desktop\Bashkiriya\Oil.gdb\Split	
()	
	-
ОК Отмена Параметры среды << Скрыть Справку	Справка инструмента

Рис. 3

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 2/2020



Puc. 5

В результате работы программы формируется след нефтяного загрязнения в виде растрового слоя, наносимый на карту в ArcGIS for Desktop. Результат моделирования с различными начальными параметрами представлен на рис. 4, 5. На рис. 4 слева направо показаны результаты моделирования разлива 800, 1700, 3500 м³ нефти; на рис. 5 – разлива 1700 м³ нефти с параметром λ, равным 0.01; 0.001; 0.0001 м соответственно.

Анализ результатов моделирования показал, что сумма объемов нефти в ячейках растра различных высот сходится с начальным объемом, что подтверждает адекватность модели, а также что площадь загрязнения, полученная при моде-

1. AO «Транснефть – Урал». История. URL: https:// ural.transneft.ru/about/activity/history (дата обращения 07.09.2019).

2. Википедия. Железнодорожная катастрофа под Уфой. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная_катастрофа_под_Уфой/ (дата обращения 07.09.2019).

3. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. М.: Ин-октаво, 2005.

4. Математическое моделирование поверхностного стока и переноса загрязнений / В. Г. Гитис, Е. Н. Петрова, С. А. Пирогов, Е. Ф. Юрков // Информационные процессы. 2007. Т. 7, № 2. С. 168–182.

5. Кутуков С. Е., Павлов С. В. Имитационный метод ранжирования участков трубопровода по экологической опасности аварийных разливов // Нефтегазовое дело. 2001. № 2. С. 101–110. лировании соизмерима с площадью, указанной в примере из нормативных рекомендаций [9]. Часть нефти достигла реки, что может привести к распространению загрязнения вдоль течения. Необходимо принять меры по недопущению распространения нефти в этом направлении.

Результаты работы алгоритма и реализованная программа могут применяться для выявления наиболее опасных участков нефтепровода, определения наиболее вероятных направлений распространения аварийных разливов в чрезвычайных ситуациях с целью их предотвращения и оптимизации работ по ликвидации последствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. Jenson S. K., Domingue J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. Vol. 54, № 11. P. 15931–600.

7. Myshko R. A., Kurakina N. I., Kovchik V. S. Geoinformational generalized flow formation model for solving problems of prognostication and emergency prevention / Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. St. Petersburg: Institute of electrical and electronics engineers, 2019. P. 1314–1317.

8. USGS. ASTER Global DEM. URL:https://earthexplorer. usgs.gov (дата обращения 07.09.2019).

9. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Минтопэнерго РФ. М.: ТрансПресс, 1996.

N. I. Kurakina, P. A. Myshko A Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

LANDSCAPE MODELING OF OIL EMERGENCY SPILLS USING GIS

In the work, the properties and behavior of oil spills accidents at oil pipelines are investigated. The analysis of the main stages of an land oil spill was carried out, the total amount of oil spilled from the pipeline and the factors affecting the initial volumes of oil spills were estimated. Existing methods for modeling the spread of oil spills are considered taking into account the topography; a combined algorithm for calculating the oil pollution configuration was developed, followed by software implementation as Python script and displaying the results on thematic maps in ArcGIS for Desktop. The questions of the influence of the phenomena of evaporation and oil filtration on the spill configuration are investigated and the adequacy of the model is evaluated. Possible modeling oil spills at the oil pipelines of the most significant oil producing regions of Russia. The results of the algorithm and the implemented program can be used to identify the most dangerous sections of the pipeline, determine the most likely directions for the spread of emergency spills in emergency situations in order to prevent them and optimize the work on eliminating the consequences.

Mathematical modeling, pollution, oil spills, oil products, geoinformational systems, analysis, ArcGIS for Desktop

УДК 519.816:655.1

А. В. Иванов Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений

В. В. Ваганов Высшая школа автоматизации и робототехники

Н. А. Билецкий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Разработка алгоритма динамического планирования полиграфического производства посредством рейтинговой системы

Динамическое планирование оперативного полиграфического производства позволяет автоматизированно создавать план производства в режиме реального времени с помощью алгоритма, базирующегося на методе приоритетных правил. На основе данного метода строится рейтинговая система заказов, определяющая очередность их запуска в работу на каждом отдельном этапе производства. Данный алгоритм позволяет исключить человеческий фактор при планировании потока заказов на производстве, где из-за оперативности выполнения работ невозможно применять статическое планирование. С помощью гибкой системы выбора приоритетных правил данная разработка позволяет размещать заказы в порядке необходимости их выполнения на каждом из этапов производства в зависимости от многих параметров заказа. Рассчитывается минимально необходимое время выполнения заказа, минимальный срок выполнения заказа с учетом загруженности оборудования в настоящий момент времени, учитывается желаемый срок изготовления продукции.

Динамическое планирование, автоматизация производства, полиграфия, управление предприятием, рейтинговая система, метод приоритетных правил

Полиграфическое производство характеризуется большой номенклатурой выпускаемой продукции и разнообразием применяемых технологий ее изготовления. Адаптация к требованиям рынка и дифференциация спроса приводят к существенным колебаниям производственно-технических параметров заказов [1]. Для эффективного управления производством необходимо осуществлять планирование, которое позволит организовать экономически выгодное изготовление конкурентоспособной продукции в срок.

Планирование производства может быть статическим и динамическим.

Статическое планирование проводится заранее, когда известны все работы и их характеристики (в начале смены/рабочего дня/недели, в зависимости от производства). Результатом статического планирования является расписание, согласно которому должны выполняться определенные этапы каждого заказа.

Динамическое планирование проводится в режиме реального времени, т. е. решения принимаются во время работы системы на основе анализа текущей ситуации. Так как на момент планирования программа не знает о заказах, которые появятся в будущем, то план производства меняется с появлением новых заказов.

На сегодняшний день разработано множество систем управления полиграфическим предприятием, которые выполняют оформление заказа, распределение заказов по этапам производства, ведение склада материала и продукции, отчеты о загрузке оборудования, планирование производства и многое другое.

В существующих системах управления полиграфическим предприятием применяется только статическое планирование производства. Это целесообразно для крупных предприятий, которые занимаются изготовлением больших по объему тиражей, не требующих гибкости производства.

Однако в связи с развитием цифровых технологий, снижением объема тиражей при увеличении их количества, уменьшением сроков изготовления продукции большую часть отечественного рынка занимают предприятия, которые занимаются оперативным изготовлением печатной продукции. Для таких компаний проводить статическое планирование нецелесообразно.

Цель исследования – разработать алгоритм динамического планирования производства для оперативного полиграфического предприятия.

Для достижения поставленной цели были проанализированы существующие решения статического планирования, выявлены параметры и данные, необходимые для разработки алгоритма динамического планирования производства. В результате анализа существующих систем планирования были выявлены следующие недостатки:

 – современные разработки не могут учитывать многих факторов, которые влияют на процесс производства (эти факторы индивидуальны для каждого предприятия);

 в созданных системах используются исключительно математические методы, которые ограничивают возможность быстрого реагирования на возникающие ситуации и не позволяют быстро корректировать расписание.

Чтобы исключить данные недостатки существующих систем планирования, необходимо использовать новые, эволюционные методы, благодаря которым возможно было бы получить оптимальное решение производственных проблем в режиме реального времени.

Система планирования должна рассматриваться как черный ящик, на вход которого подаются различные параметры планирования, составляется расписание и происходит проверка эффективности с помощью ключевых критериев.

Расписание, получаемое на выходе, представляет собой идеализацию технологического процесса изготовления продукции. При его формировании некоторые параметры имеют случайный характер, что значительно влияет на процесс производства и оперативное планирование. В реальных условиях возникают ситуации, которые приводят к отклонениям от плана, – например, поломка оборудования, инструмента, нехватка материалов на складе, брак. В связи с этим возникает необходимость внесения изменений.

Эффективность перепланировки расписания зависит от данных, которые можно ввести в систему для контроля отклонений, и от длительности процесса перепланировки. Поддержание расписания в актуальном состоянии является важнейшей задачей.

Система управления полиграфическим предприятием состоит из баз данных (БД) [2]. Для оперативного планирования должны быть заведены справочники:

1) операций O_i – допечатные, печатные и послепечатные;

нормирования операций по времени T_{Oi} – операции нормируются формулой или константой;

3) оборудования B_i – перечень оборудования;

4) времени работы оборудования T_{B_i} – для отра-

жения времени работы смены и перерыва на обед;

5) журналы оператора (ЖО), в которых сотрудник S_i будет видеть только те операции, в выполнении которых он принимает участие.

Каждая операция O_i привязана к определенному оборудованию B_i . Для операций заказа заводится нормирование по времени T_{O_i} в зависимости от параметров заказа.

Новый заказ формируется посредством набора необходимых операций O_i на этапах допечатной подготовки, печати и постпечатной обработки, а в зависимости от тиража, количества печатных листов, формата изделия и других параметров высчитывается количество времени T_{O_i} , затрачиваемое на каждую операцию.

Получив время T_{O_i} , необходимое на выполнение операции O_i , можно понять, сколько времени T_{B_i} оборудование будет занято выполнением каждой операции заказа.

На основе данных о выполнении последующих операций O_{i+1} данного заказа, а также операций других заказов $O_s + O_{s+1} + O_{s+2} + ... + O_{i+n}$ создается расписание прохождения потоков заказов на производственном участке.

При решении задачи оперативного планирования производства фактором, более важным, чем ограничения, накладываемые на процесс выполнения работ, является способ (критерий) оценки выбранного решения (в данном случае расписания) [3].

Как правило, критерии оценки эффективности расписания выражаются через показатели работы. К таким показателям относятся:

 время окончания работы (момент завершения последней операции);

 время прохождения (время протекания работы на производственном участке);

 время ожидания (время ожидания выполнения операции, составляющая часть времени прохождения);

 время задержки (разность между плановым и фактическим сроками завершения работы);

5) время запаздывания (при положительном значении эквивалентно времени задержки).

Для того чтобы охарактеризовать производственный участок, рассматривают всего два показателя:

 коэффициент загрузки оборудования (отношение времени занятости работой оборудования к общему времени, в течение которого эта машина может быть использована);

.....

2) объем незавершенных работ.

При оценке эффективности расписания необходимо минимизировать или максимизировать среднее, общее, максимальное или минимальное значения этих показателей. Чаще всего наиболее важна минимизация длительности производственного процесса, т. е. минимизация максимального времени прохождения работ.

Также к важнейшим задачам относится минимизация времени запаздывания, поскольку большинство реальных задач планирования связано с производством заказов, имеющих жесткие плановое сроки, нарушение которых ведет к экономическим потерям предприятия.

В случае, когда основной интерес представляет минимизация затрат, связанная с составленным расписанием, для оценки оптимальности планирования каждому показателю присваиваются постоянные удельные затраты и критерий эффективности выражается как линейная сумма таких оценок. Например, при минимизации незавершенного производства, максимизации использования машин и минимизации общих задержек в качестве критерия оценки используются затраты, которые в этих случаях прямо пропорциональны перечисленным показателям.

Между различными критериями оценки расписания изготовления заказов существует определенная зависимость [4]. Например, среднее время исполнения заказа и средний объем незавершенного технологического процесса имеют прямо пропорциональную зависимость и оцениваются количеством работы.

Расписание, которое считается оптимальным и эффективным для производственного процесса предприятия относительно таких показателей, как среднее время изготовления одного заказа, среднее время доступности (разность между временем поступления заказа в производство и плановым сроком, в статистическом случае она равна нулю), количества оборудования (либо коэффициента загрузки оборудования), удовлетворительно и относительно других показателей.

Если согласно составленному расписанию минимизируется среднее время прохождения заказа на производственном участке, то и средний объем незавершенных работ по изготовлению изделий также минимизируется.

Однако взаимосвязь между различными показателями работы не всегда так очевидна.

.....

Например, если согласно расписанию минимизируется среднее время прохождения заказа на производственном участке, то этим обеспечивается и минимизация среднего времени запаздывания. Минимизация же максимального времени прохождения заказа на производственном участке совсем не обязательно обеспечивает минимизацию максимального времени запаздывания.

Примеры целевых функций:

 $C_{\max} = \max_{i=1,...,n} c_i$ – время завершения всех ра-

бот;

 $L_{\max} = \max_{i=1,...,n} (c_i - d_i)$ – запаздывание относительно директивных сроков;

$$D_{\max} = \max_{i=1,\dots,n} (c_i - d_i)$$
 – отклонение от дирек-

тивных сроков;

$$F_{\max} = \max_{i=1,...,n} (\max\{0; c_i - d_i\}) - \text{опережение}$$

директивных сроков;

 $\sum_{i=1}^{n} w_i c_i$ – взвешенная сумма окончания работ, где *n* – количество необходимых работ, *w_i* – весовой коэффициент.

Для решения задач теории расписаний наиболее эффективны методы искусственного интеллекта. Их применение основано на использовании приоритетных правил.



На рис. 1 представлен алгоритм использования таких правил для решения задач оперативного планирования. После оформления заказа и определения исходных данных и показателей система оперативного планирования составляет расписание, которое является идеализацией технологического процесса в целом. Затем происходит проверка эффективности расписания в режиме реального времени на основании выбранных критериев (приоритетных правил). Выбор приоритетных правил зависит от индивидуальных особенностей предприятия и учитывает наиболее значимые факторы для производства продукции. После анализа расписания происходит перепланировка порядка запуска заказов.

Приоритетные правила бывают простые и сложные. К простым относят правила с одним предусловием. В случае, когда невозможен однозначный выбор по простому правилу или когда необходимо расширить количество учитываемых параметров и характеристик обработки, применяют комбинированные приоритетные правила, которые представляют собой комбинацию простых предусловий [5].

Основные приоритетные правила:

1. Правило FCFS (First Come First Service) – первым пришел, первым обслуживается.

 Правило SPT (Shortest ProcessingTime) – правило кратчайшей операции (если время изготовления заказа на данном этапе производства минимально, то этот заказ запускается в первую очередь).

3. Правило LPT (Longest ProcessingTime) – правило максимально длинной операции (если время изготовления заказа на данном этапе производства максимально, то этот заказ запускается в первую очередь).

4. Правило LUKR – выбор заказа, для которого длительность всех оставшихся операций минимальна (если время изготовления заказа на всех оставшихся этапах производства минимально, то этот заказ запускается в первую очередь).

5. Правило MWKR – выбор заказа, для которого длительность оставшихся операций максимальна (если время изготовления заказа на всех оставшихся этапах производства максимально, то этот заказ запускается в первую очередь).

6. Правило FOPNR – правило минимального числа оставшихся невыполненных операций (если число невыполненных операций изготовления продукции минимально, то этот заказ отправляется в производство первым). 7. Правило DDATE – правило плановых сроков. Приоритет отдается деталям, плановые сроки готовности которых наступят раньше.

8. Правило OPNDD – правило поэтапных плановых сроков. Приоритет определяется с помощью деления планового срока на длительность выполнения операции, т. е. $\frac{T_{inn} + T_{\text{тех}}}{t_{ij}} = \tau_{ij}$, где

 T_{inn} – интегральная составляющая времени, позволяющая устранить статистические ошибки); $T_{\text{тех}}$ – технологическое время изготовления. При этом возможны два варианта данного правила:

 если значение параметра т_{ij} минимально, то *i*-й заказ изготавливается на *j*-м оборудовании первым;

 если значение параметра τ_{ij} максимально,
 то *i*-й заказ изготавливается на *j*-м оборудовании первым.

Правила 4 и 5 называются антитетическими правилами, так как при выполнении их условий заказ идет в производство либо первым, либо последним. Такие противоположные правила были введены ввиду того, что одно из них может оказаться эффективнее другого для технологического процесса изготовления продукции.

Перечисленные правила не гарантируют однозначного планирования порядка изготовления заказов на предприятии. Для этого используется проверка эффективности расписания по нескольким приоритетным правилам. После анализа расписания на соответствие первому выбранному правилу происходит анализ по второму, в результате чего выбирается наилучший вариант расписания, перепланированный в соответствии с первым правилом.

Для упрощения алгоритма оперативного планирования производства удобнее всего воспользоваться комбинированными правилами, которые составляются из нескольких простых предусловий.

Например:

1. Заказ поступает в производство в первую очередь, если время прохождения заказа на данной операции минимально и заказ имеет наименьший номер.

 Заказ поступает в производство в первую очередь, если оставшееся время нахождения заказа в производстве максимально и заказ имеет наименьший номер.

Номер заказа	Прав	ило 1	Прав	ило 2	Выбор порядка запуска			
	Порядок запуска	Рейтинг заказа	Порядок запуска	Рейтинг заказа	Рейтинг заказа	Порядок запуска		
1								
2								
L								

 Заказ поступает в производство в первую очередь, если число невыполненных этапов производства по изготовлению заказа максимально, время оставшихся операций минимально и заказ имеет наименьший номер.

Для планирования порядка запуска заказов на производственный участок предприятия может быть использован следующий алгоритм, в котором порядок изготовления продукции определяется в соответствии с несколькими приоритетными правилами, которые выбираются в зависимости от их эффективности для каждого конкретного предприятия [6].

Для этого используется рейтинговая система определения порядка запуска заказа в производство. Каждое правило может иметь свой рейтинг. Чем выше эффективность правила для производства, тем больший рейтинг оно имеет. После определения порядка выполнения заказов по каждому правилу оценивается рейтинг заказа по этому правилу. Чем раньше заказ запускается в обработку, тем выше его рейтинг. Рейтинг первого по порядку заказа равен количеству обрабатываемых заказов L, рейтинг второго по очереди поступления заказа равен L - 1, третьего -L - 2, и т. д. Последнему по порядку заказу присваивается рейтинг, равный 1. В том случае, если рейтинг правила больше единицы, то рейтинг заказа умножается на рейтинг правила.

Полученные данные сводятся в рейтинговую таблицу, структура которой аналогична структуре таблицы, представленной в данной статье.

После определения суммарного рейтинга каждого заказа определяется окончательный порядок выполнения продукции. Первым запускается заказ, суммарный рейтинг которого оказался наибольшим, остальные – в порядке убывания. Чем больше суммарный рейтинг заказа, тем раньше заказ запускается на обработку.

Если возникла конфликтная ситуация, когда рейтинги разных заказов оказались одинаковыми, то первым поступает на изготовление заказ, порядковый номер которого меньше всех.

Таким образом, в данной статье был разработан алгоритм динамического планирования производства полиграфического предприятия, который позволит эффективно реализовать систему управления потоками заказов при оперативном изготовлении печатной продукции, учитывающую оптимальное использование производительности технологического оборудования, лимитированного перечня заданных материалов и нормативных ограничений по времени реализации полиграфических изделий.

Разработанный алгоритм динамического планирования необходим для оперативной полиграфии, так как позволяет планировать работу в режиме реального времени и меняет план производства в течение рабочего дня. Благодаря используемому методу приоритетных правил данная система гибка и может быть реализована на базе различных полиграфических предприятий. Результатом применения данной технологии может стать фактическое отражение загруженности оборудования на момент оформления нового заказа, расчет срока выполнения с учетом параметров продукции. Данное решение не только облегчает оформление заказов, но и оптимизирует их распределение на всех этапах, выстраивая заказы в порядке срочности выполнения для оператора на каждом этапе производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронова Г. В. Организация полиграфического производства. М.: Изд-во МГУП, 2002.

2. Волкова Л. А. Издательско-полиграфическая техника и технология. М.: Изд-во МГУП, 1999.

3. Танаев В. С., Ковалев М. Я., Шафранский Я. М. Теория расписаний. Групповые технологии / ИТК НАН Беларуси. Минск, 1998.

4. Матвейкин В. Г., Романов А. Д., Явник Р. М. Информационная система предприятия: построение

Информатика, вычислительная техника и управление

моделей и поиск оптимального управления // Вестн. ТГТУ. 2003. № 4. С. 638–645.

5. Построение системы показателей для оценки эффективности наукоемкой производственной системы / В. Г. Матвейкин, С. И. Татаренко, Б. С. Дмит-

A. V. Ivanov Publishing Press Association

V. V. Vaganov Higher school of automation and robotics

N. A. Biletsky

Saint Petersburg polytechnic university of Peter the Great

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DYNAMIC PLANNING OF POLYGRAPHIC PRODUCTION BY MEANS OF A RATING SYSTEM

Dynamic planning of operational printing production allows you to automatically create a production plan in real time using an algorithm based on the priority rule method. Based on this method, a rating system of orders is built that determines the order in which they are put into operation at each individual stage of production. This algorithm eliminates the human factor when planning the flow of orders in production, where due to the speed of work it is impossible to apply static planning. Using a flexible system for selecting priority rules, this development allows you to place orders in the order they need to be completed at each stage of production, depending on many order parameters. The minimum required lead time, the minimum lead time, taking into account the workload of the equipment at the current time, is calculated, takes into account the desired production time.

Dynamic planning, automation of production, printing, enterprise management, rating system, priority rules method

риевский, И. С. Панченко // Вестн. ТГТУ. 2009. Т. 15, № 2. С. 278–284.

6. Brucker P. Scheduling Algorithms. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1995.



УДК 621.3.019.3

EKTPOTEL

Г. В. Комарова, С. А. Круглов Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оценка надежности автоматизированной системы контроля параметров турбогенератора

Рассмотрены вопросы оценки показателей надежности комплекса технических средств автоматизированной системы контроля параметров турбогенератора. Комплекс является многофункциональной системой. Для него построена структурная схема надежности, сформированная на основе выполняемых функций. В статье представлены основные элементы системы и их наработки на отказ. Расчет показателей надежности комплекса технических средств проводился двумя способами: с использованием структурной схемы надежности и методом построения графов состояний. В соответствии с рассмотренными методами сделан расчет результирующей наработки на отказ. Для обеспечения требуемой наработки на отказ рассмотрен один из способов повышения надежности – использование запасного имущества и принадлежностей. Проведено расчетное исследование показателей надежности комплекса технических средств при различных вариантах формирования запасного имущества и принадлежностей.

Показатель надежности, наработка на отказ, интенсивность отказов, интенсивность восстановления, коэффициент готовности, ЗИП (запасные инструменты и принадлежности), программно-технический комплекс, турбогенератор, резервирование, структурная схема надежности, граф

Появление и развитие различных электротехнических систем (ЭТС) требует тщательной проработки вопросов их надежности, начиная с этапа их проектирования и производства и заканчивая испытаниями и эксплуатацией.

Без использования теории надежности невозможно или крайне трудно создавать безотказное электрооборудование (ЭО) и системы, решать вопросы выбора структуры и рационального резервирования объекта. Организация системы контроля и снабжение запасным имуществом и принадлежностями (ЗИП) также относятся к вопросам надежности сложных ЭТС.

В настоящее время электроэнергетика – важнейшая техническая область, а энергетическое оборудование является одним из самых надежных. Однако в условиях непрерывного функционирования эксплуатационная надежность оборудования из-за воздействия внешних факторов с течением времени ухудшается и возникает опасность появления отказа, который может привести к сбою электроэнергетической системы. Потребителя снабжают электроэнергией в основном турбо- и гидрогенераторы (ТГ, ГГ) [1]. Диагностика ТГ и ГГ проводится с помощью программно-технических комплексов (ПТК) систем автоматизированного контроля (АСК), нацеленных на мониторинг и обработку параметров исследуемого объекта.

Для того чтобы ПТК обеспечивал достоверность данных, он сам должен иметь высокую надежность, технический ресурс, срок службы и безотказность во время эксплуатации, поэтому одной из основных задач теории и практики производства и эксплуатации таких ПТК является обеспечение высоких показателей надежности (ПН). Безотказная работа электростанций определяется надежной работой их подсистем и комплексов мониторинга параметров ЭО.

В статье рассматриваются вопросы оценки показателей надежности системы автоматизированного контроля и регистрации параметров турбогенератора. Система разработана ООО «Ракурс-инжиниринг». Рассматриваемая система контроля – восстанавливаемая и может иметь следующие показатели надежности: средняя наработка на отказ; интенсивность отказов; среднее время восстановления объекта; интенсивность восстановления; коэффициент готовности.

Для повышения надежности системы применимы следующие способы: замена элементов на более надежные; использование различных способов резервирования и применение ЗИП.

При использовании ЗИП отказавшие элементы не ремонтируют, вместо этого неработоспособный элемент заменяют на запасной. Такая замена может быть выполнена обычным эксплуатационным персоналом. Существуют различные стратегии пополнения комплекта ЗИП: периодическое пополнение, периодическое пополнение с экстренными доставками, непрерывное пополнение и пополнение по уровню ЗИП. Каждая из стратегий имеет свои время и условия пополнения. Существуют различные комплекты ЗИП: одиночный комплект восстанавливает элементы только одного типа; групповой комплект обслуживает уже несколько видов элементов.

Рассматриваемый ПТК автоматизированной системы контроля турбогенератора состоит из трех шкафов:

 – шкафа АСКГ, содержащего оборудование подсистем контроля температуры (СТК) и диагностики оборудования;

 – шкафа средств сбора данных (ССД), содержащего оборудование подсистем контроля температуры шкафа, контроля вибрации конструктивных элементов статора (СКВ) и контроля витковых замыканий в обмотке ротора (КВЗ);

 – шкафа контроллера средств сбора данных (КССД), содержащего оборудование подсистем контроля электрических режимов работы (СКЭР), температуры и диагностики оборудования шкафа.

В табл. 1 представлены основные элементы шкафов АСК, входящие в его структурную схему надежности. Наработка на отказ T_0 предоставлена компаниями-изготовителями (ООО «Ракурс-инжиниринг», «Siemens», «Mean Well» и т. д.). В табл. 1 ЦИП – цифровой измерительный преобразователь.

Оценка надежности и построение структурной схемы надежности (ССН) ПТК проводится по функциям АСК: измерения (Ф1); вычисления (Ф2); регистрации (Ф3); предоставления информации на монитор (Ф4). Последовательность выполнения функций ПТК представлена на рис. 1 и 2.

Блок 1-1 выполняет функцию измерения, блок 2-1 – функцию вычисления, блок 3 – функцию регистрации и блок 4 – функцию представления информации. Все эти блоки входят в состав шкафа АСКГ (рис. 1). Аналогично работают блоки шкафов КССД и ССД (рис. 2).

Объединенная ССН ПТК АСКГ, представленная на рис. 3, включает в себя все блоки, где блок L – групповой комплект ЗИП, в который входят запасные элементы каждого типа для данной системы.

К ПТК предъявляются следующие общие требования по надежности [2]:

 – при расчете не учитываются надежности первичных преобразователей и датчиков;

.....

Наименование элемента	Обозначение на ССН	Кол-во, шт.	Наработка на отказ, тыс. ч.	ЗИП
Монитор панельный 17"	A1	2	417.8	1
Коммутатор линии связи с двумя RS422	AN	24	100.0	3
ЦИП сигналов виброакселерометров	AS	27	100.0	4
Усилитель мощности	PA	2	50.0	1
ЦИП с повышенной скоростью измерений 2-канальный	А	32	100.0	4
ЦИП термометров сопротивления	А	146	100.0	12
Модуль процессора	CPU	2	572.9	1
Модуль коммутационный	СР	9	1275.0	1
Модуль ввода, 16 дискретных входов	I16	2	922.4	1
Модуль ввода, 32 дискретных входа	132	2	268.0	1
Модуль вывода, 16 дискретных выходов	O16	2	925.9	1
Модуль вывода, 32 дискретных выхода	O32	1	925.9	1
Источник питания	UZ120	5	289.9	1
	UZ480	4	112.9	1
Компьютер встраиваемый	MXE	4	100.0	1

Таблица 1





 – шкафы системы должны обеспечить наработку на отказ не менее 50 тыс. ч;

 – гарантийный срок службы системы должен быть не менее 2 лет;

 – критерием отказа следует считать отказ в передаче затребованной информации в течение более 5 мин;

– состав ЗИП должен обеспечивать восстановление функционирования системы. При этом ЗИП не должен быть менее единицы для каждого типа модулей АСК. Первоначальный комплект ЗИП устанавливается ООО «Ракурс-инжиниринг» (табл. 1).

Для оценки надежности АСК применимы методы структурных схем и построения графов, рассматриваемые в статье.

Метод структурных схем универсален и прост независимо от строения схемы. В основе ССН лежит электрическая структурная схема системы. Для повышения ПН используется дублирование элементов. Расчет надежности ПТК реализуется с применением основных теорем теории вероятностей [3].

Методика расчета ПН, основанная на применении структурных схем надежности, включает следующие этапы: – описание элементной базы и функций объекта;

 построение структурной схемы надежности подсистем и всего объекта;

 – сбор и обработка информации о ПН элементов структурной схемы;

– расчет ПН подсистем, функций и объекта в целом;

– сравнение ПН (средней наработки на отказ)
 ПТК с нормативными требованиями;

 – выбор способа резервирования и расчет количества ЗИП, при невыполнении требований по надежности;

 выбор стратегии пополнения комплекта ЗИП;

 – уточнение расчета ПН при использовании резервирования и ЗИП.

Во втором методе (методе графов) состояния системы изображаются в виде вершин, которые соответствуют работоспособным и неработоспособным состояниям. Возможные переходы между состояниями – ребра, характеризуемые интенсивностью либо отказа λ , либо восстановления μ . Основные правила построения графа:

 построение начинается с вершины, в которой все элементы системы работают;

 – каждое последующее состояние получается при отказе одного из элементов схемы;

 – количество последующих состояний равно количеству элементов, которые могут отказать в предыдущем состоянии;

 – если состояния совпадают по сочетанию состояний элементов, то они объединяются в одну вершину;

 новые состояния появляются до тех пор, пока все состояния не станут неработоспособными.
 Такие состояния – конечные вершины графа.

Расчет надежности основывается на решении системы дифференциальных уравнений, которые составляются исходя из построенного графа. Одно из уравнений заменяется нормирующим условием (сумма всех вероятностей состояний равна единице).

В качестве примера составления графа рассмотрен блок 3 ССН (рис. 4). Изначальное состояние S₀ характеризует работоспособное состояние всех элементов блоков. Вероятность нахождения в данном состоянии равна P₀, интенсивность перехода в первое состояние равна $2\lambda_{MXE}$, а в третье – λ_{UZ480} . Это обусловлено количеством элементов. Блок состоит из двух параллельно работающих компьютеров МХЕ и одного источника питания UZ480, который включен последовательно относительно системы компьютеров. Вернуться в изначальное состояние можно с интенсивностью µ, равной для обоих состояний – первого и третьего. Первое состояние S₁ характеризуется отказом одного из компьютеров, при этом система не выходит из строя, так как компьютеры МХЕ дублируют друг друга. Третье состояние характеризуется отказом, потому что если источник питания UZ480 выходит из работоспособного состояния, то вся система не работает.

Все исходящие из состояния переходы записываются со знаком минус, входящие – со знаком плюс.

При составлении системы уравнений, если используется последовательное соединение элементов, можно воспользоваться формулой

$$-P_0\sum_{i=1}^N\lambda_i+\sum_{i=1}^NP_i\mu_i=0$$

где λ_i , μ_i – интенсивности отказа и восстановления элемента.

Составлена система уравнений для блока 3:

$$\begin{split} &-P_0(2\lambda_{\rm MXE} + \lambda_{\rm UZ480}) + P_1\mu + P_3\mu = 0;\\ &P_02\lambda_{\rm MXE} - P_1(\lambda_{\rm MXE} + \lambda_{\rm UZ480} + \mu) + \\ &+ P_2\mu + P_4\mu = 0;\\ &P_1\lambda_{\rm MXE} - P_22\mu = 0;\\ &P_0\lambda_{\rm UZ480} - P_3\mu = 0;\\ &P_1\lambda_{\rm UZ480} - P_4\mu = 0, \end{split}$$

где *P*₂, *P*₃, *P*₄ – вероятности нахождения системы в состояниях 2, 3, 4 соответственно.

Коэффициент готовности системы равен сумме вероятностей безотказной работы (ВБР) P_0 и P_1 :

$$\mathbf{K}_{\Gamma} = P_0 + P_1.$$

Элементы отказывают по экспоненциальному закону распределения. Результаты расчета *T*₀ двумя методами без учета ЗИП (I – метод структурных схем; II – метод графов) представлены в табл. 2.

При расчете методом структурных схем суммарная наработка получилась равной 8722 ч, что на 5 % больше, чем при расчете методом графов состояний.

Проведен расчет ПН с учетом ЗИП. В расчете определены T_0 для однородных элементов с учетом ЗИП. Функция распределения Эрланга используется в описании ВБР системы с учетом периодического пополнения ЗИП [4]:

$$I(x,m) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{x^i}{i!} e^{-x}.$$



Шкаф	Выполняемые функции			емые функции	Метод I, <i>T</i> ₀ , тыс. ч	Метод II, <i>T</i> ₀ , тыс. ч
АСКГ				Ф1-1	96.67	96.63
				Φ 2-1. Φ1-1	38.99	38.98
		•	Φ	3-1, Φ2-1, Φ1-1	28.98	28.85
	Φ4-1, Φ3-1, Φ2-1, Φ1-1			3-1, Φ2-1, Φ1-1	27.10	27.00
ССД; КССД			Ф1-2	17.33	17.33	
				Ф2-2. Ф1-2	13.75	13.75
			Φ3-2, Φ2-2, Φ1-2		12.26	12.24
	Φ4-2, Φ3-2, Φ2-2, Φ1-2			3-2, Ф2-2, Ф1-2	11.90	11.88

Таблица 2

Таблица 3

Наименование	Обозначение на ССН	Кол-во, шт.	<i>T</i> ₀ элемента, тыс. ч	ЗИП	<i>T</i> ₀ однородных элементов, тыс. ч
Монитор панельный 17"	A1	2	417.8	1	2019.0
Усилитель мощности	PA	2	50.0	1	59.2
Модуль процессора	CPU	2	572.9	1	3659.0
Модуль коммутационный	СР	9	1275.5	1	987.8
Модуль ввода, 16 дискретных входов	I16	2	922.4	1	9118.0
Модуль ввода, 32 дискретных входа	I32	2	268.0	1	8928.0
Модуль вывода, 16 дискретных выходов	016	2	925.9	1	9168.0
Модуль вывода, 32 дискретных выхода	O32	1	925.9	1	35 520.0
Источник питания	UZ120	5	289.9	1	2089.0
	UZ480	4	112.9	1	69.6
Компьютер встраиваемый	MXE	4	100.0	1	346.3

Для расчета наработки на отказ последовательной однородной системы с учетом ЗИП используется формула

$$T_0 = \frac{A}{k\lambda} \left(\frac{1}{I(A,L+1)} - \frac{1}{2} \right)$$

где $A = k\lambda T_{\Pi}$, T_{Π} – период пополнения ЗИП; k – количество работающих основных элементов; λ – интенсивность отказов элемента; L – количество элементов ЗИП в комплекте.

Для расчета наработки на отказ дублированной однородной системы с учетом ЗИП применяется формула

$$T_0 = \frac{1}{k\lambda} \frac{2^{L+2} (1 - e^{-A/2}) - \sum_{i=0}^{L} (2^{L+1-i} - 1) I(A, i+1)}{I(A, L+1) - 2^{L+1} e^{-A/2} I(A/2, L+1)}$$

Если система представляет собой последовательно соединенные дублированные системы, где a = A/2, то

$$T_{0} = \frac{1}{k\lambda} \left[8 \cdot 2^{L} \left(1 - e^{-2a} \right) - \frac{16}{3} 4^{L} \left(1 - e^{-3a} \right) - \frac{16}{3} \left(1 - 4 \cdot 2^{L-i} + 4 \cdot 4^{L-i} \right) I(A, i+1) \right] / \left[I(A, L+1) - 4 \cdot 2^{L} e^{-2a} I(2a, L+1) - 4 \cdot 4^{L} e^{-3a} I(a, L+1) \right].$$

Сначала проведены расчеты ПН с периодом пополнения ЗИП T_{Π} , равным 50 тыс. ч, что соответствует самой низкой наработке на отказ элемента в системе (табл. 3).

Результирующая средняя наработка на отказ системы ПТК АСКГ составляет 26.1 тыс. ч, что обусловлено элементами РА и UZ480, у которых наработка на отказ самая низкая. При этом большое количество элементов имеют запасы ЗИП, не увеличивающие среднюю наработку на отказ системы и приводящие к большим материальным затратам на оборудование.

В последующих расчетах изменен период пополнения T_{Π} ЗИП для элементов РА, UZ480, UZ120, A1, I32, CPU, I16, O16, O32, CP и MXE. Увеличено количество ЗИП до двух для элементов РА, UZ120 и UZ480. Результаты расчета T_0 однородных элементов представлены в табл. 4.

Итоговая наработка системы составляет 51.9 тыс. ч, что соответствует предъявляемым требованиям по надежности [2].

В данной статье рассмотрены вопросы оценки и обеспечения надежности комплекса технических средств (КТС) автоматизированной системы контроля параметров турбогенератора.

Таблица 4

Наименование	Обозначение	Кол-во, шт.	T_0 одного	ЗИП	T_{Π} ,	<i>Т</i> ₀ однородных
	на ССН		элемента, ч		тыс. ч	элементов, тыс. ч
Монитор панельный 17"	A1	2	417.8	1	200	704.6
Усилитель мощности	PA	2	50.0	2	25	298.8
Модуль процессора	CPU	2	572.9	1	200	1189.0
Модуль коммутационный	СР	9	1275.5	1	50	987.8
Модуль ввода, 16 дискретных входов	I16	2	922.4	1	500	1444.0
Модуль ввода, 32 дискретных входа	I32	2	268.0	1	200	355.0
Модуль вывода, 16 дискретных выходов	O16	2	925.9	1	500	1453.0
Модуль вывода, 32 дискретных выхода	O32	1	925.9	1	500	4625.0
Источник питания	UZ120	5	289.9	2	100	351.1
	UZ480	4	112.9	2	25	400.5
Компьютер встраиваемый	MXE	4	100.0	1	50	346.3

Расчет показателей надежности проводился двумя методами: при построении структурной схемы надежности и методом графов состояний системы. В статье сформулированы основные этапы оценки надежности. Проведен сравнительный расчет результирующей наработки на отказ КТС двумя методами без учета запасных частей, который показал незначительную разницу результатов (5 %). Для повышения надежности рассмотренная структура КТС включает запасные части, которые также учтены при расчете. Сначала сделана оценка показателей надежности с периодом пополнения первоначального ЗИП 50 тыс. ч. Затем рассмотрены вопросы повышения результирующей наработки на отказ до требуемого уровня при различных вариантах формирования и пополнения ЗИП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветошкин А. Г. Надежность технических систем и техногенный риск. Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003.

2. Система автоматизированная контроля и регистрации параметров турбогенератора: техническое задание / Ракурс-инжиниринг. СПб., 2018.

G. V. Komarova, S. A. Kruglov Saint Petersburg Electrotechnical University

RELIABILITY ASSESSMENT OF AUTOMATED MONITORING SYSTEM OF TURBOGENERATOR'S PARAMETERS

The issues of assessing the reliability measure (RM) of a complex of technical means (CTM) are considered automated system for monitoring the parameters of a turbogenerator. The complex is multifunctional system. For the complex, a reliability block diagram (RBD) is constructed, formed based on the functions performed. The article presents the main elements of the system and their MTBF. Calculation of indicators CTM reliability was carried out by two methods: using RBD and the method of constructing state graphs. In accordance with the methods considered, the calculation of the resulting MTBF is made. To ensure the required MTBF, one of the ways to increase reliability is considered – the use of spare elements (SPTA). A calculation study of the reliability indicators of the CTM with various options the formation of spare parts.

.....

Reliability measure, time to failure, failure rate, restoration rate, availability factor, SPTA (spare parts, tools and accessories), software-hardware complex, turbogenerator, redundancy, reliability block diagram, graph

3. Надежность технических систем: справ. / под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.

4. Черкесов Г. Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
УДК 621.9.27.004.42

И. С. Носиров, А. М. Белов Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оптимизация параметров процесса резания токарного станка с ЧПУ с использованием генетического алгоритма

Рассматривается оптимизация параметров механической обработки на токарном станке с использованием искусственного интеллекта. Определение оптимальных параметров резания имеет важное значение для экономичной обработки и играет важную роль в уменьшении ошибок обработки и сохранении устойчивости оснастки станка. Чтобы получить большую эффективность и производительность станка, необходимо добиться оптимальных параметров процесса резания, для чего был использован генетический алгоритм (ГА). В результате анализа существующих методов исследований выявлено, что его использование эффективно при прогнозировании формы и шероховатости поверхностей деталей при механической обработке. Рассмотрена оптимизация параметров процесса механической обработки для различных глубин резания. Определены оптимальные параметры обработки (глубина резания, скорость подачи для улучшения шероховатости поверхности). Также была получена минимальная стоимость резания.

Токарная обработка, параметры процесса резания, режимы резания, оптимизация, генетический алгоритм

Постановка проблемы. Современная тенденция в механической обработке заключается в достижении более высоких скоростей обработки материала с требуемой точностью, стремлении к максимальной производительности и обеспечении экономичности производства. Качество изготовления деталей на металлорежущих станках зависит от задания исходных параметров процесса резания. Их выбор влияет на срок службы инструмента, время обработки и стоимость изготовления. Минимизация затрат на обработку детали также служит в качестве одного из критериев определения оптимальных параметров резки. К факторам, влияющим на токарную обработку детали, относится изменение условий процесса обработки в зависимости от внутреннего изменения свойств рабочего материала, теплового расширения, износа инструмента и т. д. Это приводит к снижению качества обрабатываемой поверхности детали в процессе механической обработки.

К недостаткам существующих методик расчета оптимальных режимов резания можно отнести большое время расчета и то, что полученные после расчета данные не позволяют вести резание с наибольшей экономичностью. В настоящее время применяются различные методы оптимизации режимов резания. Их выбор зависит от типа станка; способа металлообработки; свойств обрабатываемого материала и т. п. В основу методов оптимизации положены критерий качества с ограничениями в виде равенств и неравенств (целевая функция оптимизации) и математическая модель, отражающая процесс резания металлов. Для решения данной проблемы предлагается использовать автоматизированную систему управления электроприводами металлорежущего станка с применением искусственного интеллекта. Существуют некоторые ограничения (верхний и нижний пределы), которые влияют на выбор оптимальных условий резания – глубины резания, скорости подачи и скорости резания:

$$\begin{cases} h_{p.min} \le h_p \le h_{p.max}; \\ S_{min} \le S \le S_{max}; \\ v_{p.min} \le v_p \le v_{p.max}, \end{cases}$$

где $h_{p.min}$, $h_{p.max}$ – минимальная и максимальная глубины резания; S_{min} , S_{max} – минимальная и максимальная скорости подачи; $v_{p.min}$, $v_{p.max}$ – минимальная и максимальная скорости резания.

Целью оптимизации служит определение оптимальных параметров обработки: скорости резания,

Электротехника



скорости подачи и глубины резания. При этом одновременно минимизируется стоимость резания и срок службы используемого инструмента при многопроходном процессе токарной обработки.

Таким образом, оптимизация параметров процесса резания – одна из наиболее актуальных задач в процессе механической обработки деталей на металлорежущих станках, представляет собой многоцелевую задачу, для решения которой классические методы оптимизации подходят только в том случае, когда ее можно свести к однокритериальной задаче, что не всегда возможно. Поэтому для решения данной проблемы можно применять ГА. Генетический алгоритм, используемый для оптимизации и моделирования, сводится к случайному подбору, комбинированию и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных отбору в биологических системах. Этот алгоритм основан на стохастических операциях. Генетический алгоритм ищет оптимальное решение в пространстве решений, начиная с групп точек, а не с начальной точки. На рис. 1 показана типичная схема генетического алгоритма [1]. Работа ГА основана на трех генетических операторах: селекции, скрещивании, мутации.

Основной элемент схемы ГА – это популяция особей, которая обычно составляет от 10 до 200. Каждый индивидуум представляет собой возможное решение проблемы. Данные, обрабатываемые ГА, представлены массивом строк (или хромосом) с конечной длиной, где каждый бит, называется аллелем или геном. Значение функции пригодности прикреплено к каждому индивидууму, для того чтобы оценить его качество. Совокупность строк называется популяцией, а популяция в определенный момент времени называется поколением. Генерация начальной популяции строк выполняется случайным образом. Основными операторами на генах в хромосоме являются кроссовер и мутация. Воспроизведение некоторых выбранных хромосом - это процесс, в котором определенные двоичные строки преобразуются и передаются следующему поколению. Выбор хромосомы обычно осуществляется через так называемый механизм рулетки. Кроссовер основной оператор, который генерирует новые строки, в конечном итоге с лучшими значениями пригодности. После кроссовера мутация выполняется для обеспечения некоторой случайности в новых хромосомах. Этот процесс создает новую популяцию, которая оценивается в соответствии с заранее определенными критериями. Процедура повторяется до тех пор, пока критерий остановки не будет удовлетворен, что достигается последовательным применением генетических операторов отбора, скрещивания и мутации, позволяя получать все более качественные решения оптимизации [2].

Процедура оптимизации состоит из двух этапов. Первый этап – математическое моделирование процесса обработки (используются характеристики резания), когда определяется целевая многопараметрическая функция. Второй этап – поиск глобального минимума целевой функции при всех ограничениях, наложенных на целевую функцию.

Математическая модель, которая описывает операцию обработки, определяется как комбинация тех функций, переменные которых необходимы для параметров резки. Математическая модель состоит из трех отдельных моделей:

1. Стойкость инструмента (резца), мин:

$$T^m = \frac{C_v K_v}{v_{\rm p} h_{\rm p}^x S^y}$$

где C_v – коэффициент, учитывающий условия обработки, при определении составляющей силы резания; K_v – поправочный коэффициент, произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания; T – стойкость инструмента, мин; h_p – глубина резания, мм; S – скорость подачи,

.....

м/мин; *x*, *y*, *m* – показатели степени, зависящие от свойства обрабатываемого металла, материала резца и вида обработки соответственно.

Обобщенный поправочный коэффициент определяется по формуле

$$K_{v} = K_{M_{v}} K_{n_{v}} K_{u_{v}} K_{\varphi_{v}} K_{r_{v}}$$

где K_{M_v} , K_{n_v} , K_{u_v} , K_{ϕ_v} , K_{r_v} – коэффициенты, учитывающие влияние материала заготовки, состояние поверхности, материал инструмента, главный угол в плане резца и радиус при вершине рез-

ца (только для резцов из быстрорежущей стали). Коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки, определяется по формуле

$$K_{M_{\nu}} = K_{r_{\nu}} \left(\frac{75}{\sigma_{\rm B}}\right)^{n_{\nu}}$$

где n_v — показатель степени при определении составляющей силы резания при обработке резцами, выбирается из [3, таблица]; $\sigma_{\rm B}$ — предел прочности при растяжении, Н. Коэффициенты и показатели степени, входящие в это уравнение, приведены в той же таблице.

2. Составляющая силы резания при точении *P_z* (в ньютонах) определяется по формуле

$$P_z = 10C_v h_p^x S^y v_p^{n_v} K_v$$

3. Эффективная мощность процесса резания *N* (в киловаттах) определяется по формуле

$$N = \frac{10C_{\nu}h_{\rm p}^{x}S^{y}v_{\rm p}^{n_{\nu}}K_{\nu}}{1020\cdot 60},$$

или

$$N = \frac{P_z v_p}{1020 \cdot 60}.$$

На рис. 2 представлен блок оптимизации параметров процесса резания при механической обработке.

Исходные данные объекта – это данные о станке и инструменте, материале и формах детали, а также ограничения по времени и стоимости изготовления. Модель инструмента интегрирована в целевую функцию, в то время как модели силы и мощности резания представлены в виде ограничивающих функций.

Согласно [4], себестоимость единицы продукции для задачи многопроходной токарной обработки состоит из четырех основных компонентов стоимости:



 резки по фактическому времени процесса резки;

 холостого хода станка (операции загрузки, разгрузки и перемещения инструмента на холостом ходу);

3) замены инструмента;

4) инструмента.

В качестве критерия оптимизации принимается минимальное время производства, определяемое суммой различных времен обработки – обработки, смены инструмента, быстрого возврата инструмента и обработки заготовки. Целевая функция времени обработки определяется как [5], [6]

$$T_{\rm c} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4,$$

где t_1 – основное время обработки, с; t_2 – время смены инструмента, с; t_3 , t_4 – времена, затраченные на процесс резания и на настройку системы управления электроприводов станка, с.

Стоимость резки для многоходового токарного процесса выражается как

$$C = E_{\rm np} t_{\rm l},$$

где $E_{\rm np}$ – прямые затраты на оплату труда плюс накладные расходы, р./мин;

$$t_1 = \frac{\pi D_{\rm cp} L}{1000 v_{\rm p} S} \cdot n = \frac{\pi D_{\rm cp} L}{1000 v_{\rm p} S} \left(\frac{d_t - d_f}{d_r} \right)$$

где D_{cp} – средний диаметр заготовки, рассчитывается по начальным d_t и конечным d_f диаметрам заготовки, мм; d_r – глубина резания при грубой обработке, мм; L – общая длина инструмента, мм; n – частоты вращения шпинделя, об/мин.

На основе приведенных уравнений стоимость резки может быть выражена как



$$C = E_{\rm IIP} \left[\frac{\pi D_{\rm cp} L}{1000 v_{\rm p} S} \left(\frac{d_t - d_f}{d_r} \right) + \frac{\pi D_{\rm cp} L}{1000 v_{\rm p} S} \right]$$

Рассмотрим процедуру оптимизации параметров механической обработки детали. Исходные данные для проведения оптимизации были взяты из технической документации токарного станка модели СМ1761ФЗ; параметры, относящиеся к типу обрабатываемого материала детали, - из справочника [7]. Мощность главного привода (шпинделя) токарного станка P_{III} = 10 кВт, максимальная и минимальная силы резания $F_{z \max} = 4300$ Н и $F_{z \min} = 2000$ Н. Заготовка имеет следующие параметры: диаметр 20 мм; длина 100 мм, материал – низколегированная сталь с HB = 180. В Matlab для оптимизации параметров процесса резания на основе ГА используются приложения Genetic Algorithm и Direct Search Toolbox [8]. При моделировании для ГА были приняты стандартные настройки. Оптимизация была проведена для диапазона глубин резания от минимального до максимального значений, которые определяются для выбранного режущего инструмента. Чтобы получить оптимальные параметры резки, было совершено несколько итераций.

Анализ показал, что в данном случае наилучшим методом оптимизации является метод бинарного линейного программирования [9]–[11]. Процесс оптимизации представлен схемой на рис. 3.

Основные параметры для настройки ГА следующие: размер популяции (20–100 особей); кодирование (выполняется с действительными числами); применен стохастический равномерный отбор; генетические операторы: равномерный кроссовер; вероятность кроссовера (0.8); частота мутаций (0.1). Условия прекращения оптимизации: 1) фиксированное число поколений (100 поколений); 2) эволюционный процесс останавливается, если лучшее решение не показало улучшения за последние 50 поколений.

В результате оптимизации выводится двоичная матрица, из которой выбирается ряд матриц, удовлетворяющих целевой функции параметров резания.

Оптимизация для каждой глубины резания выполняется отдельно с целью нахождения оптимальных параметров процесса резания. Генетический алгоритм работает до тех пор, пока не будут выполнены критерии остановки, как показано на рис. 4.

Скорость	Скорость	Время	Мощность	Усилие	Частоты	Глубина
подачи	резки	обработки	резания	резания	вращения	резания
(<i>S</i>), мм/мин	$(v_{\rm p}),$	(<i>T</i> _{об}), мин	(<i>P</i> _p), Вт	(<i>F</i> _p), H	шпинделя	(<i>h</i> _p), мм
	м/мин		r	r	(<i>n</i>), об/мин	r
0.90	603	4.70	16.15	1608.18	3998	1.0
0.90	588	4.72	23.59	2405.80	3987	1.5
0.89	566	4.81	29.99	3178.94	3919	2.0
0.78	518	5.62	29.96	3467.89	3669	2.5
0.72	464	6.40	29.90	3864.34	3360	3.0
0.68	420	7.11	29.99	4286.21	3109	3.5
0.77	327	7.80	29.99	5505.45	2476	4.0
0.70	320	8.44	29.99	5629.99	2483	4.5
0.40	496	9.06	29.96	3621.02	3953	5.0

Анализируя график на рис. 4, можно сделать следующее выводы:

1. От т. 1 до т. 5: наблюдается значительное снижение срока службы используемого инструмента и соответствующее увеличение общего времени работы. Следует отметить, что снижение срока службы используемого инструмента является неприемлемым, чем увеличение времени обработки детали на металлорежущих станках (около 12 %).

2. От т. 5 до т. 14: время работы увеличивается примерно на 10 %, а срок службы используемого инструмента незначительно уменьшается.

В таблице приведены оптимальные параметры процесса механической обработки и минимальные времена изготовления детали, полученные при оптимизации с помощью ГА. Можно сделать вывод, что генетический алгоритм – это современный метод нахождения оптимальных значений функций со многими переменными, в частности для оптимизации процесса токарной обработки. Данный подход позволяет реализовать процедуру определения оптимальных технологических параметров обработки для конкретной геометрии изделия быстро и с высокой точностью. Оптимизация параметров обработки для различных процессов предназначена для повышения эффективности обработки за счет сокращения затрат, расходуемых на производственные процессы в соответствии с современными экономическими потребностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Al-Aomar R., Al-Okaily A. A GA-based parameter design for single machine turning process with high-volume production // Computers & Industrial Engineering. 2007. № 50. Р. 317–337.

2. Cus F., Balic J. Optimization of cutting process by GA approach // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2003. № 19. P. 113–121.

 Безъязычный В. Ф., Аверьянов И. Н., Кордюков А. В. Расчет режимов резания: учеб. пособие / РГАТА. Рыбинск, 2009.

4. Shin Y. C., Joo Y. S. Optimization of machining conditions with practical constraints // Intern. J. of Production Research. 1992. Vol. 30, № 12. P. 2907–2919.

5. Agapiou J. S. The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 2: Multipass operations // J. Eng. Ind. Trans. ASME. 1992. № 114. P. 508–513. 6. Deep K., Thakur M. A new mutation operator for real coded genetic algorithms // Appl. Math. Comput. 2007. № 193. P. 21–23.

7. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985.

8. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. СПб.: РИЦ ГУАП, 2008.

9. Matousek J., Gärtner B. Understanding and using linear programming. Springer, 2006.

10. Elaouda S., Teghemb J., Bouazizc B. Genetic algorithms to solve the cover printing problem // Computers & Operations Research. 2007. № 34. P. 3346–3361.

11. Елисеев В. Г., Козырева Н. А. Применение линейного программирования в итерационной процедуре планирования загрузки оборудования // Науч. сессия МИФИ-2006: сб. науч. тр.: в 16 т. Т. 11. Инновационные проекты, студенческие идеи, проекты, предложения. М.: Изд-во МИФИ, 2006.

I. S. Nosirov, A. M. Belov Saint Petersburg Electrotechnical University

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A CNC LATHE CUTTING PROCESS USING A GENETIC ALGORITHM

The optimization of machining parameters on a lathe and the use of artificial intelligence. Determining the optimal cutting parameters is important for economical machining and plays an important role in reducing machining errors and maintaining the stability of the machine tooling. To obtain greater efficiency and productivity of the machine, it is necessary to obtain optimal parameters of the cutting process. To find the optimal parameters of the cutting process, a genetic algorithm (GA) was used. Having analyzed the existing research methods, it was revealed that when predicting the shape and surface roughness of parts during machining, the use of GA is effective. The optimization of the parameters of the machining process for various cutting depths is considered. The optimal processing parameters (cutting depth, feed rate to improve surface roughness) are determined. The minimum cost of cutting was also obtained.

Turning, cutting process parameters, cutting conditions, optimization, genetic algorithm

УДК 621.311.23:629.1

Ю. Н. Хижняков, А. А. Южаков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Векторно-матричное нечеткое управление частотой вращения свободной турбины турбовинтового двигателя

Методы теории нечетких множеств (нечеткой логики) нашли широкое применение в задачах управления. Однако при использовании аппарата нечеткой логики необходимо выбирать модели нечетких логических операций, исходя из эмпирических соображений. Это затрудняет построение алгоритмов решения конкретных задач. Применение «классических» операций оправдано только для решения простых задач и не требует большого количества правил. Предлагается применение векторных моделей, направленных на простоту реализации, высокое быстродействие и расширение области применения. Использование матричного аппарата заменяет проекции вектора лингвистической переменной (терм-множество) нечеткими векторами. Основные операции над нечеткими векторами приведены в работах М. А. Марценюка, на базе которых рассмотрено проектирование векторного нечеткого регулятора частоты вращения турбовинтового двигателя. Новым является применение синглтонной базы для активации нечетких векторов фаззификатора, а также метода разности площадей как метода дефаззификации.

Предикаты, продукционные правила, нечеткая прямая импликация, нечеткая обратная импликация, нечеткий векторный регулятор, турбовинтовой двигатель

В настоящее время основное направление развития прикладных задач ориентируется на разработку моделей трудно формализуемых сложных систем, состоящих из большого числа взаимодействующих компонентов. Нечеткая логика есть математический аппарат теории нечетких множеств, моделирующий человеческие рассуждения, что позволяет применять ее для построения алгоритмов управления сложными системами на языке высокого уровня.

Методы нечеткой логики нашли многочисленные применения в задачах управления, относящихся к разным областям человеческой деятельности: в промышленности [1]–[3], на транспорте [4] и многим другим. Понятия нечеткой логики и представления о нечетких множествах были впервые введены в работах Л. Заде [5]. В дальнейшем было разработано несколько вариантов реализации нечетких логических операций и основанных на них алгоритмов, а также способов получения информации с использованием нечетких систем [6]–[9].

Однако при использовании аппарата нечеткой логики возникает необходимость выбора моделей

нечетких логических операций – пересечение, объединение, дополнение, импликации, композиция и т. д. В литературе предложено большое количество вариантов их реализации, но все они выбраны из эмпирических соображений, что затрудняет построение алгоритмов решений конкретных задач. Так, например, по Л. Заде логическая операция «пересечение» выражается как $a \wedge b = \min(a,b)$, а логическая операция «объединение» – как $a \vee b = \max(a,b)$, где a и bесть рациональные числа на отрезке [0, 1].

В дальнейшем модели нечетких логических операций, введенные Л. Заде, будем называть «классическими».

Применение «классических» операций оправдано только для решения относительно простых задач, не требующих большого количества правил или многоэтапного логического вывода [10]. Кроме того, рассматриваемые неаналитические модели нечетких логических операций требуют при реализации на ЭВМ большого числа вычислительных устройств и объема памяти.

В связи с этим существует необходимость разработки нового, более обоснованного представления операций нечеткой логики, а также новых моделей алгоритмов нечеткого вывода, направленных на простоту реализации, высокое быстродействие и расширение области применения.

В работах М. А. Марценюка [11]–[13] для представления нечетких переменных и операций над ними предложено использовать матричный аппарат. Так, прямоугольная функция принадлежности может быть представлена нечетким вектором.

Если ввести базисные векторы $e^{(0)}$ и $e^{(1)}$, то отдельно нечеткий вектор **x** может быть представлен в виде

$$\mathbf{x} = x_0 \mathbf{e}^{(0)} + x_1 \mathbf{e}^{(1)},$$

причем координаты вектора **x** (числа x_0 , x_1) должны удовлетворять условию

$$0 \le x_0, \ x_1 \le 1,$$
 (1)

т. е. принадлежать множеству F = [0, 1] и удовлетворять условию нормировки

$$x_0 + x_1 = 1. (2)$$

В дальнейшем удобно использовать понятие пространства нечетких векторов V. Векторы $\mathbf{e}^{(0)}$ и $\mathbf{e}^{(1)}$ образуют ортонормированный базис этого пространства. Любой нечеткий вектор может быть представлен в виде проекций x_0 , x_1 . Условие нормировки означает, что концы любого нечеткого вектора **x** лежат на отрезке AB, соединяющем точки (1, 0) и (0, 1) (рис. 1). На рисунке пространство нечетких векторов V включает векторы, отложенные от начала координат и заканчивающиеся на отрезке AB.

Таким образом, пространство V образовано всеми векторами, начинающимися в начале координат и заканчивающимися на отрезке AB. Отметим, что в пределе четкой логики пространство Vсводится к двум базисным векторам $e^{(0)}$ и $e^{(1)}$.

Логические операции над нечеткими векторами: конъюнкцию, дизъюнкцию и импликацию, можно представить также в матричном виде [13].

Составим из компонент вектора **x** матрицу $I(\mathbf{x})$ размером 2 × 2:

$$I(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (3)

С помощью матрицы (3) логическая операция над нечетким вектором может быть представлена в виде

$$\mathbf{x} \to \mathbf{y} = I(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y},\tag{4}$$

где вектор у следует представлять как матричный столбец 2×1 , составленный из его компонент $\binom{\nu_0}{\nu_0}$

 $\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix}$, а точка обозначает матричное умноже-

ние. В явном виде (4) имеет вид

$$\mathbf{x} \to \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 y_0 \\ x_0 y_0 + y_1 \end{pmatrix}.$$
 (5)



Результат логической операции, сформулированной в виде нечеткого отношения, есть нечеткий вектор. Детальное обоснование сделанного выбора матриц представлено в [13]. В «классическом» подходе [5] значение функции принадлежности $\mu(u)$ элементов *и* универсального множества *U* заданному нечеткому подмножеству U_x может выступать как свойство этих элементов *и*. Такое описание хорошо подходит под определение предикатов, применение которых для нечеткой логики введено в [11]–[15].

Нечеткий предикат $\mathbf{x}(u)$ задается функцией, определенной на универсальном множестве U и принимающей значения в пространстве нечетких векторов V. При этом координаты нечеткого вектора $\mathbf{x}(u)$ выражаются через функцию принадлежности $\mu_x(u)$ следующим образом:

$$\mathbf{x}(u) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_x(u) \\ \mu_x(u) \end{pmatrix}$$
(6)

и удовлетворяют условию (1).

Как видно из определения нечеткого предиката (6), он полностью задается функцией истинности $\gamma(u)$, которая соответствует функции принадлежности элементов *и* некоторому нечеткому подмножеству U_x . В матричном подходе на этапе реализации решения задачи намного удобнее оперировать именно предикатами, а не функциями принадлежности нечетких множеств, хотя оба выражения эквивалентны. Число предикатов в зависимости от инерционности переходных процессов выбирать от 3 до 11.

Почти все реально работающие прикладные системы используют промежуточные нечеткие оценки на базе продукционных правил, которые продемонстрированы на приведенном далее примере. Для дальнейшего преобразования нечеткой информации необходимо задать терм-множество треугольных терм (частный случай) лингвистической переменной выхода и с помощью метода разности площадей рассчитать четкий выход регулятора.

Таким образом, рассмотрен векторно-матричный подход к проектированию нечеткого регулятора стохастического объекта, обеспечивающий простоту и высокое быстродействие при управлении. Далее рассмотрим применение предложенного подхода к проектированию нечеткого регулятора свободной турбины турбовинтового двигателя (ТВД).

Пример. Рассмотрим проектирование векторного нечеткого регулятора частоты вращения свободной турбины ТВД.

ТВД есть нелинейный многорежимный объект с достаточно высокой мерой неопределенности математического описания. Данный объект

имеет один вход (дозирующее устройство) и *п* селективно управляемых выходов. На ТВД влияют внутренние неконтролируемые возмущения (протечка разогретого топлива в дозаторе, изменение зазора в регуляторе сопло-заслонка дозатора и т. д.) и внешние возмущения (отклонения температуры и давления воздуха на высоте от заданных значений и т. д.) [16].

В качестве управляемого выхода ТВД примем, например, относительную частоту вращения вентилятора

$$\sigma_1 = \frac{n_{\rm B}}{n_{\rm B.HOM}},$$

где $n_{\rm B}$ – частота вращения генератора; $n_{\rm B. \, HOM}$ – номинальная частота вращения генератора.

Примем в качестве управляющего воздействия ТВД дозатор, который охвачен отрицательной обратной связью по положению хода иглы, с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{G(p)}{X_{\mathrm{I,N},\mathrm{Sag}}(p)} = \frac{K_{\mathrm{I,Y}}}{T_{\mathrm{I,Y}}p+1}$$

где G(p) – расход топлива дозатора в операторной форме; $X_{\text{д.и.зад}}(p)$ – заданное перемещение дозирующей иглы в операторной форме; p – оператор; $K_{\text{д.у}}$, $T_{\text{д.y}}$ – коэффициент усиления и постоянная времени.

На рис. 2 приведена структурная схема векторного нечеткого регулятора ТВД: ВФ1, ВФ2 – векторные фаззификаторы; слой 1 – векторные фаззификаторы, выраженные через предикаты a-e; слой 2 – нечеткие отношения A-D; слой 3 – нормализаторы; 4 – дефаззификатор; $\Delta \sigma$ – отклонение текущего значения от заданного значения; G – расход топлива дозатора.





Puc. 3

Для формирования нечеткого множества на синглтонной базе используется унимодальная функция принадлежности (синглтон), которая жест-ко связана с входными переменными [17], [18]. Для случая двух лингвистических переменных (отклонение и производная отклонения) зададим следующие терм-множества предикатов, представленных в графическом виде (рис. 3, *a* – предикаты ошибки отклонения; *б* – предикаты производной ошибки отклонения) и аналитически:

по ошибке отклонения:

$$a(\Delta\sigma) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_a(\Delta\sigma) \\ \mu_a(\Delta\sigma) \end{pmatrix}; \quad b(\Delta\sigma) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_b(\Delta\sigma) \\ \mu_b(\Delta\sigma) \end{pmatrix};$$
$$c(\Delta\sigma) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_c(\Delta\sigma) \\ \mu_c(\Delta\sigma) \end{pmatrix};$$

по производной ошибки отклонения:

$$d\left(\dot{\Delta}\sigma\right) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_d\left(\dot{\Delta}\sigma\right) \\ \mu_d\left(\dot{\Delta}\sigma\right) \end{pmatrix} e\left(\dot{\Delta}\sigma\right) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_e\left(\dot{\Delta}\sigma\right) \\ \mu_e\left(\dot{\Delta}\sigma\right) \end{pmatrix}.$$

Для определения отношений между векторными фаззификаторами запишем продукционные правила:

А. Большое отрицательное отклонение ошибки *а* требует большой положительной производной *d*.

В. Малое отрицательного отклонения ошибки *b* требует малой положительной производной *d*.

С. Малое положительного отклонения ошибки с требует малой отрицательной производной е.

D. Большое положительное отклонение ошибки *d* требует большой отрицательной производной *e*.

Для реализации продукционных правил запишем нечеткие отношения A, B, C, D в аналитическом виде (выходы слоя 2):

$$A: a(\Delta\sigma) \to d(\dot{\Delta}\sigma) =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a}(\Delta\sigma) & 0 \\ \mu_{a}(\Delta\sigma) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) \\ \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{cases} [1 - \mu_{a}(\Delta\sigma)] [1 - \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma)] \\ \mu_{a}(\Delta\sigma) [1 - \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) + \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma)] \end{cases};$$



Нечеткие отношения *A*, *B*, *C*, *D* реализуются нечеткими элементами «И», число которых равно количеству продукционных правил. Выходы блока нечетких отношений (слой 2) рассчитывают относительные значения выполнения продукционных правил.

Абсолютные значения выполнения продукционных правил слоя 3 (нормализаторы) определяются по формулам

$$A^{*} = \frac{A}{A+B+C+D}; B^{*} = \frac{B}{A+B+C+D};$$
$$C^{*} = \frac{C}{A+B+C+D}; D^{*} = \frac{D}{A+B+C+D}.$$

Выходы слоя 3 формируются асинхронно в зависимости от расположения синглтонов в текущий момент времени. Слой 4 реализует нечеткую композицию (свертку) и дефаззификацию с помощью метода разности площадей.



На рис. 4 приведено терм-множество из треугольных линейных терм дозирующего устройства ТВД: $G^* = \{G_1\} + \{G_2\} + \{G_3\} + \{G_4\}$ и показана нечеткая композиция терм по Мамдани при значениях $A^* = 0.68$; $B^* = 0$; $C^* = 0$; $D^* = 0$.

Нечеткое отношение А выполнено согласно

$$A: a(\Delta\sigma) \to d(\dot{\Delta}\sigma) =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a}(\Delta\sigma) & 0 \\ \mu_{a}(\Delta\sigma) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) \\ \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 - \mu_{a}(\Delta\sigma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) \end{bmatrix} \\ \mu_{a}(\Delta\sigma) \begin{bmatrix} 1 - \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) + \mu_{d}(\dot{\Delta}\sigma) \end{bmatrix} \end{cases} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0.3 \cdot 0.3 \\ 0.8 \cdot 0.3 + 0.44 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.09 \\ 0.68 \end{pmatrix},$$

где за выход принято из примера значение 0.68 (при текущих положениях синглтонов по отклонению ошибки и производной отклонения ошибки).

Для формирования выхода векторного нечеткого регулятора применен метод разности площадей [19], который базируется на универсальной формуле нахождения площадей геометрических фигур, как показано на рис. 5:

– трапеции

$$S_{\text{трап}} = \frac{h}{6} \left(b_1^* + 4b_2^* + b_3^* \right) = \frac{h}{2} \left(b_1^* + b_3^* \right); \quad (7)$$

– треугольника

$$S_{\rm Tp} = h b_{\rm l}^* / 2 \, .$$



Использование формул обосновано тем, что в результате реализации нечеткого вывода треугольные термы выходной функции принадлежности трансформируются в трапециевидную форму (отсечение по Мамдани, где h = 1).

Алгоритм метода разности площадей:

 определение общей площади фигур терммножества данной лингвистической переменной;

– определение высоты усеченной термы (по Мамдани);

 определение общей площади терм-множеств данной лингвистической переменной с учетом усеченной термы;

 определение отношения площадей (выход регулятора);

- определение выхода регулятора.

Порядок расчета:

– определяем площадь четырех (n = 4) треугольных терм (рис. 5)

$$S_{\text{общ}} = \frac{nb_{l}^{*}}{2} = \frac{4 \cdot 6}{2} = 12 \text{ y. e.;}$$

- определяем площадь усеченной фигуры по (7)

$$S_{\text{общ.ус}} = 2.6928 \text{ y. e.;}$$

 определяем отношение общей площади и площади усеченной фигуры

$$K = \frac{S_{\text{общ.ус.}}}{S_{\text{общ}}} = \frac{2.6928}{12} = 0.2244 \text{ y. e.;}$$

- определяем выход регулятора:

при условии: $A^* = 0.68, B^* = 0, C^* = 0, D^* = 0$ $G_1 = \begin{bmatrix} Kb_1^* \end{bmatrix} + g_{H1} = 0.2244 \cdot 6 + 15 = 16.347$ у.е.; при условии : $A^* = 0, B^* = 0.68, C^* = 0, D^* = 0$ $G_2 = \begin{bmatrix} Kb_1^* \end{bmatrix} + g_{H2} = 0.2244 \cdot 6 + 18 = 19.347$ у.е.; при условии: $A^* = 0, B^* = 0, C^* = 0.68, D^* = 0$ $G_3 = \begin{bmatrix} Kb_1^* \end{bmatrix} + g_{H3} = 0.2244 \cdot 6 + 21 = 22.347$ у.е.;



при условии : $A^* = 0, B^* = 0, C^* = 0, D^* = 0.68$

$$G_4 = \left[Kb_1^*\right] + g_{H4} = 0.2244 \cdot 6 + 24 = 25.347 \text{ y. e.},$$

где G_1, G_2, G_3, G_4 – расходы топлива дозатора; $g_{\rm H}$ – начальный расход топлива.

На рис. 6 приведена осциллограмма частоты вращения свободной турбины ТВД по управлению, полученной на основании представленного ранее расчета (*nb_i*, *nby_i* – фактическое и программное значения частоты).

При изменении задания на 2500 об/мин время регулирования составило 11 с при нулевой статиченического задания. В заключение необходимо отметить следую-

в заключение необходимо отметить следующее:

ской ошибке, что согласуется с требованиями тех-

1. В статье предложен векторно-матричный подход к проектированию нечеткого регулятора расхода топлива ТВД, обеспечивающего простоту и высокое быстродействие при управлении.

2. Получены аналитические выражения предикатов и их графическое представление, что позволяет преобразовать четкую информацию в нечеткую.

3. Приведены продукционные правила базы знаний и их аналитическое представление, что позволяет реализовать отношения нечетких векторных переменных.

 Для формирования выхода векторного нечеткого регулятора применен метод разности площадей.

5. Моделирование подтвердило правомерность векторно-матичного подхода при проектировании нечетких регуляторов стохастических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Konar A. Computational intelligence: principles, techniques and applications. Springer, 2005. P. 71.

2. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // Proc. IEEE. 1974. Vol. 121, № 12. P. 121–159.

3. Kickert W., Van Nauta Lemke H. Application of a fuzzy controller in a warm water plant // Automatica. 1976. Vol. 12. P. 301–308.

4. Siegel D., Hansman J. Development of an autoland system for general aviation aircraft. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011.

5. Zadeh L. A. Outline of a new approach to analysis of complex systems and decision processes // IEEE Trans. Syst. ManCybern. 1973. № 1. P. 28–44.

6. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International // J. of Man-Machine Studies. 1975. № 7. P. 1–13.

7. Larsen P. M. Industrial applications of fuzzy logic control. International // J. of Man-Machine Studies. 1980. Vol. 12, № 1. P. 3–10.

8. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control // IEEE Trans. On. 1985. № 1. P. 116–132.

9. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method. North-Holland. Amsterdam, 1979. P. 137–149.

10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017.

Марценюк М. А., Поляков В. Б., Селетков И. П.
 Матричная реализация алгоритмов нечеткого выво-

да // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политех. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 6 (162). С. 133–141.

12. Марценюк М. А. Матричное представление нечеткой логики // Тр. IX междунар. конф. «Интеллектуальные системы и компьютерные науки». М.: Изд-во МГУ, 2006. Т. 4. С. 32–36.

13. Марценюк М. А. Матричное представление нечеткой логики // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Науч. журн. Рос. ассоциации нечетких систем и мягких вычислений. 2007. Т. 2, № 3. С. 7–35.

14. Алиев Р. А., Церковный А. Э., Мамедова Г. А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991.

15. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / пер. с англ. М.: Мир, 1976.

16. Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991.

17. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5. С. 17–21.

18. Хижняков Ю. Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех. ун-та, 2013.

19. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9. С. 32–41.

Yu. N. Khizhnyakov, A. A. Yuzhakov Perm national research polytechnic university

VECTOR MATRIX FUZZY CONTROL OF THE ROTATIONAL SPEED OF A TURBOPROP ENGINE FREE TURBINE

The methods of fuzzy logic have found wide application in control problems. However, when using the fuzzy logic apparatus, it is necessary to choose models of fuzzy logic operations, which are selected from empirical considerations. This makes it difficult to construct algorithms for solving specific problems. The use of «classical» operations is justified only for solving simple problems and does not require a large number of rules. The use of vector models aimed at ease of implementation, high speed and expansion of the application area is suggested. The use of the matrix device replaces the projections of the vector of the linguistic variable (term-set) with fuzzy vectors. The basic operations on fuzzy vectors are given in the works of Marcenyuk MA, on the basis of which the design of a vector fuzzy speed controller for a turboprop engine is considered. New is the use of a singleton base for the activation of fuzzy vector fuzzyfikator, the application of the method of difference areas as a method of defuzzification.

Predicates, product rules, fuzzy direct implication, fuzzy reverse implication, fuzzy vector regulator, turboprop engine

УДК 621.314

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

Ведущая научно-педагогическая школа «Электротехнология» – исследования и разработки

описаны направления научных исследований и разработок в области обработки металлов токами высокой частоты (ТВЧ), а также приведены примеры технологий и оборудования, разработанные и внедренные в промышленность Межотраслевой лабораторией «Современные электротехнологии» (МОЛ СЭТ) учебнонаучного центра «Высокочастотная электротехника» (УНЦ ВЧЭТ) факультета электротехники и автоматики (ФЭА) СПБГЭТУ совместно с ООО «Научно-исследовательский, образовательный и производственный центр высокочастотных электротехнологий» (ООО «ИНТЕРМ»). Основные направления деятельности: разработка мощных высокочастотных транзисторных преобразователей; разработка автоматизированных станков с программируемой системой управления для индукционной поверхностной закалки деталей сложной формы, например рабочих поверхностей железнодорожных авто сцепных устройств, где после сканирования поверхности лазерным датчиком строится траектория движения индуктора; разработка установок индукционной пайки, например прецизионной пайки в вакууме большого числа бериллиевых пластин на элемент внутренней поверхности камеры токамак по проекту ИТЭР; разработка технологий и оборудования для горячей посадки, индукционного отпуска сварных швов, правки плоских сварных настилов из стали и алюминиевых сплавов, импульсной термомеханической обработки поверхности стальных деталей, нагрева нефти и многое другое. Широко используются программируемые системы управления для закалочных станков автоматов, позволяющих выполнять в автоматическом режиме закалку ТВЧ большой номенклатуры машиностроительных деталей, внедряются аддитивные технологии для производства некоторых элементов индукционных установок, спрейеров, трансформаторов тока, согласующих устройств и т. п. По части направлений выпущено и внедрено оборудование, по другим проведены НИРОКР и построены опытные образцы, еще части требуется проведение НИР, программы обучения студентов бакалавриата и магистратуры нуждаются в модернизации. Все это говорит о том, что в области индукционных технологий также идет подготовка к четвертой промышленной революции и данное направление будет востребовано в ближайшем будущем, поэтому особую роль играет подготовка кадров высшей квалификации на новом уровне.

Электротехнология, индукционный нагрев, электромагнитная обработка металлов, нагрев нефти, транзисторные преобразователи частоты, аддитивные технологии, четвертая промышленная революция

Академик В. П. Вологдин – основоположник электротермии – отрасли народного хозяйства

СССР, в которой на государственном уровне комплексно решались проблемы подготовки научных, инженерных и рабочих кадров, научных исследований, промышленного производства электротермических установок и их внедрения на машиностроительных и металлургических предприятиях [1]. Это обеспечило лидирующие позиции советской школы электротермии в мире.

Сегодня в промышленности в еще большей степени востребованы технологии электромагнитной обработки материалов, а современные элементная база силовых высокочастотных преобразователей, средства автоматизации и управления, средства компьютерного моделирования процессов открыли новые возможности и расширили области применения индукционного нагрева.

Ведущая научно-педагогическая школа «Электротехнология» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» продолжает развитие этого направления силами кафедры ЭТПТ и межотраслевой лаборатории МОЛ СЭТ, готовит бакалавров и магистров, а также кадры высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре, выполняет совместно с профильными предприятиями научные исследования и опытноконструкторские работы по созданию электротермических технологий и оборудования для промышленности.

Далее кратко описаны основные направления НИР и НИОКР, а также промышленное высокочастотное электротермическое оборудование, разработанное МОЛ СЭТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и тесно сотрудничающей с «ЛЭТИ» фирмой «Научнотехнический, образовательный и производственный центр высокочастотных электротехнологий "ИНТЕРМ"» [2].

Моделирование электромагнитных и тепловых полей, напряжений и деформаций в процессе индукционного нагрева стало рабочим инструментом и используется при разработке индукционных систем и технологических процессов. В качестве примера на рис. 1 показаны результаты экспериментального исследования и компьютерного моделирования процесса индукционного нагрева цилиндрической детали из магнитной стали, который приводит к интересному эффекту - полосатому нагреву при прохождении температуры поверхности через точку Кюри, т. е. через температуру потери магнитных свойств стали. Результаты исследования неустойчивости изотермы Кюри, приводящей к полосатому нагреву в статических и динамических режимах, описаны в ряде публикаций [3]-[5]. На рис. 1, а показана фотография стального цилиндра в индукторе, где отчетливо видна неравномерность температуры поверхности в виде отдельных колец, причем на светлых кольцах температура превышает температуру Кюри, а на темных – ниже нее. На рис. 1, б виден спиральный след, оставшийся после сканирующей закалки ТВЧ с вращением цилиндрической стальной детали, который также может быть следствием полосатого нагрева. На рис. 1, в представлен трехмерный график зависимости температуры на поверхности цилиндрической детали из магнитной стали от координаты х по длине детали с течением времени, полученный с помощью компьютерного моделирования. Гребни на поверхности показывают, когда зарождаются полосы нагрева и где они локализованы по длине цилиндра.



.....









Транзисторные генераторы для индукционного нагрева. ООО «ИНТЕРМ» разработано серия генераторов ТГИ мощностью 10, 40, 60, 100 и 160 кВт в частотных диапазонах 66 и 440 кГц. Налажено мелкосерийное производство этих генераторов для комплектации электротермических установок по заказам промышленности [6]–[11].



На рис. 2 представлена фотография транзисторного генератора ТГИ40-66. Генераторы серии ТГИ имеют программируемую систему управления, позволяющую настроить генератор на стабилизацию или регулирование по программе выходной мощности, тока или температуры нагрева детали. Сенсорный экран дает возможность оперативно получать информацию о выходных параметрах генератора, о температуре нагреваемого объекта, диагностическую информацию о температуре его внутренних элементов, расходе охлаждающей жидкости, скорости вращения вентиляторов, причинах аварийного отключения и пр. Имеется также возможность вывести на экран выходную характеристику генератора с отображением текущей рабочей точки, что позволяет судить об оптимальности согласования генератора с индуктором. Основные параметры режима работы генератора сохраняются на внешнем носителе в режиме реального времени и могут быть проанализированы в графическом виде, в том числе могут быть построены годографы вектора полного сопротивления индуктора, необходимые для оптимального согласования источника с нагрузкой.

Выполнена НИР и подготовлена кандидатская диссертация по проблеме устойчивости транзисторных преобразователей к помехам со стороны нагрузки, наводимым на индуктор от других близкорасположенных индукторов [12], [13].

Высокочастотные трансформаторы и согласующие устройства для индукционных нагревателей. Разработаны типовые проекты, по которым создаются устройства, согласующие серийные ге-

нераторы с уникальными индукционными системами. Преимущество данной разработки состоит в высоком КПД и отсутствии внешних полей, что делает их эксплуатацию безопасной [14]. ООО «ИНТЕРМ» налажен их мелкосерийный выпуск.

Высокочастотный гибкий полосковый кабель на ток до 400 А. Обеспечивает передачу энергии от генератора к согласующему устройству на расстояние до десятков метров, не требует охлаждения, защищен от высокочастотных разрядов и механических повреждений, не имеет внешнего электромагнитного поля, легко прокладывается с изгибами без ухудшения параметров. ООО «ИНТЕРМ» налажен его мелкосерийный выпуск.

Высокочастотный скользящий силовой контакт на ток до 400 А. Обеспечивает передачу энергии от генератора к вращающемуся или движущемуся согласующему устройству при сканирующей закалке цилиндрических или кольцевых поверхностей крупногабаритных деталей. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» выполнен НИР.

Проектирование индукторов и спрейеров, ориентированных на аддитивные технологии производства. Использование 3D-печати позволяет не только изготавливать смешные игрушки (рис. 3, a), но и создавать оптимальные устройства для охлаждения (спрейеры) при закалке ТВЧ (рис. 3, δ). После появления на рынке качественных 3D-принтеров, печатающих медью, появится возможность распространить эту технологию на проектирование и изготовление индукторов и индукторов-спрейеров, которые за счет точности изготовления, применения новых конструктивных решений и легкости копирования позволят существенно повысить качество закалки ТВЧ, снизить трудоемкость и себестоимость продукции.





.....

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 2/2020



Puc. 4



Puc. 5

Разработка технологических процессов и закалка ТВЧ партий машиностроительных деталей по заказам промышленных предприятий: валы и шлицевые валы, колеса, зубчатые колеса и венцы большого диаметра с модулем от 6 и выше, погоны, рельсы, детали автосцепок [15] и пятников балок железнодорожных вагонов, детали привода железнодорожных стрелок, захваты, звездочки, балансиры, коромысла, компенсаторы, колеса с ребордами и без них, трубы и пр. Разработанная в ООО «ИНТЕРМ» база закалочного оборудования и механизированной оснастки позволяет выполнять эти работы в кратчайшие сроки. На рис. 4 показаны рабочие моменты закалки ТВЧ звездочки и рельса, а на рис. 5 – закаленное ТВЧ зубчатое колесо диаметром 3300 мм (410 зубьев, модуль 8).

Оборудование для одновременной индукционной пайки короткозамыкающих колец к стержням обмоток ротора двигателя. ООО «ИНТЕРМ» разработано и поставлено в ОАО «Силовые машины» оборудование – генератор ТГИ160, блок согласования, индукционная система, система управления с контролем температуры нагрева. Требуется НИОКР для совершенствования технологии пайки высокотемпературными припоями. Тема предложена сотруднику ПАО «Силовые машины», принятому в аспирантуру СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Технология и оборудование для индукционной пайки в вакууме твердым припоем одновременно более ста бериллиевых пластин на элементы внутренней поверхности камеры токамак по проекту ИТЭР разработаны и внедрены ООО «ИНТЕРМ» в НИИЭФА. На рис. 6 представлена фотография процесса пайки на воздухе макета с молибденовыми пластинами, заменяющими при исследовании бериллиевые. Разработанная прецизионная система индукционного нагрева обеспечивает требуемый максимальный разброс температуры по площади пайки в пределах ± 15 °C. В данном комплексе используется генератор ТГИ 100-66 мощностью 100 кВт в частотном диапазоне 66 кГц, а для контроля и регулирования темпера-



Puc. 6

туры – 12 термопар, сигналы от которых анализируются микроконтроллером.

Индукционная правка сварных листовых конструкций за счет локального интенсивного индукционного нагрева. Технология актуальна для судостроительных заводов при изготовлении корпусов кораблей. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» разработаны компьютерные модели и исследованы процессы термической деформации стальных и алюминиевых оболочек, в том числе при механических нагрузках. Проведены экспериментальные исследования на элементах палубы корабля из алюминиевого сплава по заданию завода «Алмаз». Доведение технологии до промышленного применения потребует проведения дорогостоящих НИОКР, связанных не только с созданием эффективных индукционных систем локального нагрева с контролем температуры, но и с разработкой стратегии нагрева оболочек с характерными деформациями и анизотропными свойствами для получения технологического эффекта правки. Заинтересованность в проведении совместной с СПбГЭТУ «ЛЭТИ» НИОКР высказали Выборгский судостроительный завод и ООО «ИНТЕРМ».

Утилизация автомобильных шин с помощью индукционного нагрева стального корта для уменьшения сцепления с резиной. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» проведены исследования, разработана и внедрена установка сканирующего индукционного нагрева предварительно разрезанной движущейся плоской части шины. Для широкого внедрения требуется проведение дорогостоящего НИОКР, который позволит исключить загрязнение окружающей среды и полностью утилизировать все составляющие шин. Желательна поддержка государственных или городских структур.

Упрочнение ТВЧ поверхности деталей автосцепок железнодорожных вагонов. Совместно с «ИНТЕРМ» и ВНИЦТТ разработана технология поверхностного упрочнения деталей автосцепок железнодорожных вагонов и получен па-

тент [15]. ООО «ИНТЕРМ» разработан, изготовлен и поставлен на один из вагоностроительных заводов России автоматизированный высокопроизводительный комплекс закалки рабочих поверхностей корпусов и замков автосцепок, в котором установленная на трехкоординатный станок деталь предварительно сканируется с помощью лазерного датчика расстояния, строится траектория движения индуктора, обеспечивающая зазор между индуктором и закаливаемой поверхностью детали 1...1.5 мм, а затем выполняется сканирующая закалка ТВЧ.

Упрочнение ТВЧ поверхности пятника балки железнодорожного вагона. Совместно с «ИНТЕРМ» и ВНИЦТТ разработана технология поверхностного упрочнения плоской кольцевой поверхности крупногабаритных деталей и подана заявка на патент. ООО «ИНТЕРМ» разработана и поставлена на один из вагоностроительных заводов России установка для сканирующей закалки плоской кольцевой и цилиндрической поверхностей пятника с поворотом индуктора на 360°. В плане совершенствования узла передачи высокочастотной энергии на вращающуюся платформу разработан вышеописанный скользящий контакт.

Монтаж и демонтаж насадных деталей с нагревом ТВЧ. Впервые применен фирмой «ИНТЕРМ» на заводе «Электросила» для нагрева бандажных колец роторов турбогенераторов в результате совместной разработки технологии нагрева и патентования гибкого индуктора [16]– [20]. Технология оказалась настолько эффективной, что завод «Электросила» разработал конструкцию титановых бандажей роторов мощных турбогенераторов (890...1200 МВт) с учетом ее возможностей, а установки нагрева ТВЧ ООО «ИНТЕРМ» включены в ремкомплект турбогенераторов, поставляемых на атомные электростанции (ЛАЭС, Белоярская АЭС и др.). Разработанная технология и оборудование нагрева ТВЧ ши-

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 2/2020



Puc. 7

роко применяются также при монтаже и демонтаже рабочих колес паровых турбин массой до 3 т на ЛМЗ ПАО «Силовые машины» (рис. 7, *a*), всех насадных деталей роторов турбогенераторов (рис. 7, б) и мощных электродвигателей (рис. 7, в), газоперекачивающих агрегатов на магистральных газопроводах «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» (рис. 7, r и d) и пр. Кроме того, по заявкам промышленных предприятий ООО «ИНТЕРМ» выполняет работы по демонтажу насадных деталей с выездом на объект. При необходимости перед работами по демонтажу насадных деталей с индукционным нагревом выполняется компьютерное моделирование с целью определения условий их расцепления. По теме монтажа и демонтажа насадных деталей с нагревом ТВЧ защищена кандидатская диссертация.

Отпуск сварных швов труб и предварительный нагрев перед сваркой с применением индукционного нагрева – перспективная технология, которая широко используется при строительстве магистральных трубопроводов, трубопроводов высокого давления на электростанциях, теплоцентралях, на кораблях и других объектах. МОЛ СЭТ и ООО «ИНТЕРМ» проводят НИОКР и выполняют практические работы с выездом на объекты по этой тематике [21]–[24]. Аспирант МОЛ СЭТ выполняет научные исследования по этой теме.

Высокоинтенсивная индукционная сканирующая закалка, т. е. закалка, при которой быстрое охлаждение после нагрева ТВЧ происходит за счет отвода тепла во внутренние холодные слои металла детали, имеет существенные преимущества перед закалкой с интенсивным внешним охлаждением с поверхности, так как в закаслое не возникают растягивающие ленном напряжения и снижается опасность образования трещин. Высокоинтенсивная закалка в частотном диапазоне выше 66 кГц возможна при удельной мощности 5...25 кВт/см² для большинства применяемых в машиностроении марок стали (первоначальные исследования проведены совместно с ЦЗЛ завода «Электросила» на сталях 45, 40Х, У9 и др.) и позволяет получить глубину закаленного слоя 0.8...2 мм. Дополнительным большим преимуществом высокоинтенсивной сканирующей закали является отсутствие спрейера, который принципиально не обеспечивает одинаковых условий охлаждения при закалке поверхностей сложной формы. Примером успешного применения технологии высокоинтенсивной закалки служит разработанная ООО «ИНТЕРМ» для Казахстана установка с программируемой системой управления для закалки деталей привода железнодорожных стрелок, которая обеспечивает закалку сложных поверхностей на семи различных деталях из двух марок стали без смены индуктора; для закалки конкретной детали необходимо лишь загрузить соответствующую программу.

Технология высокоинтенсивной импульсной закалки с электромеханическим наклепом является перспективным способом упрочнения поверхности с получением мелкозернистой кристаллической или даже аморфной структуры металла. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» проведены экспериментальные исследования на различных марках сталей и получены положительные результаты. В экспериментах использовался специально разработанный импульсный транзисторный генератор ТГИ 100-66 мощностью 100 кВт на частоте 66 кГц с программируемой длительностью импульса и паузы в диапазоне от 20 мс с шагом 20 мс. Технология может быть полезна, например, при поверхностном упрочнении тонколистовых конструкций для специальных применений. Для доведения технологии до промышленного применения потребуются дорогостоящие НИОКР.

Технология индукционного сканирующего отпуска после закалки ТВЧ создает перспективы существенного ускорения и упрощения процесса отпуска, позволяет, не используя муфельную печь, не снимая с закалочного станка деталь и не меняя индуктор, произвести не только низкий отпуск для снятия напряжений, но и высокий отпуск для снижения твердости закаленного слоя до заданных в чертеже значений. Технология будет полезна при отпуске длинномерных деталей (валы, рельсы, ножи), деталей большого диаметра (погоны), а также при отпуске локальных участков крупногабаритных деталей после закалки ТВЧ. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» выполнены экспериментальные исследования влияния температуры и длительности нагрева на твердость закаленного слоя для одной марки стали. По этой теме защищена магистерская диссертация. Для разработки технологии и доведения ее до практического использования потребуются дорогостоящая НИОКР.

Индукционные программируемые закалочные станки позволяют выполнять закалку и отпуск партий деталей с высокой производительностью и повторяемостью результатов и легко перестраивать установку для закалки однотипных деталей разных типоразмеров за счет изменения программы закалки. Далее приведены примеры таких станков, разработанных и внедренных ООО «ИНТЕРМ»:

 – станок-автомат для закалки большой номенклатуры муфт (автоматическая загрузка цилиндрических муфт разных типоразмеров с лотка и выгрузка после закалки в тару);

 – станок для закалки деталей привода железнодорожных стрелок (двухкоординатный привод, высокоинтенсивная закалка без внешнего охлаждения, без смены индуктора);

 – станок для закалки валов (вертикальный закалочный станок) (рис. 8, *a*);

 станок для закалки литых деталей сложной формы – автосцепок железнодорожных вагонов (трехкоординатный привод, сканирование детали лазерным датчиком расстояния, построение траектории перемещения индуктора при закалке ТВЧ);

– станок для закалки широкой номенклатуры ползунов (двухкоординатный привод, высокоинтенсивная закала без смены индуктора) (рис. 8, δ);

 – станок для закалки погонов, зубчатых венцов и звездочек диаметром до 3.5 м;

 – станок для закалки валов и труб с вращением в горизонтальном положении.

Индукционный нагрев нефти – планируется совместная НИОКР МОЛ СЭТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ООО «ИНТЕРМ» по индукционному нагреву нефти непосредственно после добычи из скважины для снижения вязкости перед очисткой и транспортировкой по нефтепроводу. Цель – создание опытного образца установки мощностью 2 МВт, промышленная эксплуатация его на скважине, разработка конструкторской документации и организация промышленного производства в интересах нефтедобывающих компаний. На данной стадии ООО «ИНТЕРМ» предложено перспективное техническое решение, проведены предварительные оценки и оформляются патенты.

Все перечисленные разработки выполнены при активном участии аспирантов МОЛ СЭТ и студентов кафедры ЭТПТ, которые привлекались к ним при прохождении практики, выполнении выпускных работ бакалавров и магистров. В 2018/19 учеб. г. число студентов, одновременно выполняющих учебные работы или работающих по совместительству в ООО «ИНТЕРМ», достигало 20 чел.

Подготовка специалистов играет ключевую роль в развитии направления высокочастотной электротермии. Наиболее востребованы промышленностью на данном этапе:

 – специалисты по моделированию систем индукционного нагрева (моделирование электромагнитных и тепловых процессов, напряжений и деформаций при индукционном нагреве, развитие моделирующих программ);

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 2/2020





Puc. 8

– конструкторы (силовая ВЧ-электроника, индукторы, печатные платы, системы электропривода, схемы электрические принципиальные, знание современной элементной базы, ориентирование на современные технологии изготовления – металлообрабатывающие станки ЧПУ и обрабатывающие центры, лазерная, плазменная и гидроабразивная резка, аддитивные технологии);

 программисты (программирование контроллеров для автоматизации технологических установок, управление силовыми транзисторными преобразователями частоты и электроприводом);

 – технологи-термисты (знание марок сталей, режимов закалки ТВЧ, режимов отпуска после закалки, проектирование индукторов для оптимального нагрева и охлаждения при закалке ТВЧ, металлографические исследования);

 – специалисты по внедрению, пуско-наладочным работам и ремонту электротермического оборудования; – системные интеграторы (проектирование электротермических установок для решения конкретной задачи с использованием оборудования ведущих производителей, а также с привлечением фирм, способных выполнить и внедрить проект).

В настоящее время потребность промышленности по каждой специализации невелика, но она будет быстро возрастать в связи с ростом промышленного производства в стране, причем будут нужны специалисты высокого уровня, способные решать практические задачи по своей специальности. Для подготовки таких специалистов необходимы соответствующие преподавательские кадры. Формально факультет ФЭА СПбГЭТУ «ЛЭТИ» имеет такие компетенции, но для достижения современного уровня преподавания, повидимому, потребуется привлечение ведущих специалистов из промышленности и, возможно, оптимизация структуры факультета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Г. И. Пионер высокочастотной техники: Жизнь и деятельность Валентина Петровича Вологдина / под ред. д-ра техн. наук Г. Ф. Головина и доц. В. В. Вологдина; вступ. ст. акад. А. И. Берга. М.: Связь, 1970. 2. Сайт ООО «Научно-исследовательский, производственный и образовательный центр высокочастотных электротехнологий "ИНТЕРМ"». URL: www. interm.su (дата обращения 12.10.19). 3. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлиев, А. А. Завороткин, Д. М. Жнакин, К. Е. Пищалев, Ю. Ю. Перевалов // Индукционный нагрев. 2013. № 1 (23). С. 36–41.

4. Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлиев, А. А. Завороткин, Д. М. Жнакин, К. Е. Пищалев, Ю. Ю. Перевалов // Индукционный нагрев. 2013. № 2 (24). С. 37–43.

5. Curie isotherm instability during scanning induction heating of magnetic steel strip / S. V. Dzliev, M. S. Golubev, K. E. Pishchalev, A. A. Zavorotkin // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St Petersburg, 2019. P. 955–960.

6. Дзлиев С. В., Патанов Д. А. Характеристики резонансного транзисторного инвертора напряжения при фазовом и частотном регулировании // Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева (APIH-2005): материалы междунар. науч.техн. конф. СПб., 2005. С. 363–369.

7. Васильев А. С., Конрад Г., Дзлиев С. В. Источники питания высокочастотных электротермических установок: Т. 4. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006 (Серия «Современные электротехнологии»).

8. Дзлиев С. В. Транзисторные источники питания индукционных нагревательных комплексов // Индукционный нагрев. 2009. № 2. С. 15–21.

9. Дзлиев С. В. Источники питания индукционных нагревательных комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.

10. Согласование транзисторных преобразователей частоты с индукционными нагревателями / С.В.Дзлиев, А.А. Завороткин, Ю.Ю. Перевалов, К.Е. Пищалев // Индукционный нагрев. 2012. № 3. С. 33–40.

11. Дзлиев С. В. Транзисторные генераторы для индукционного нагрева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.

12. Dzliev S. V., Abdulhakov I. U. A group work of semiconductor resonant inverters of magnetically coupled induction systems // Intern. Scientific Electric Power Conf. ISEPC-2019. St Petersburg, 2019. Vol. 643, № 1. P 1–7.

13. Абдулхаков И. Ю., Дзлиев С. В. Исследование магнитной связи двух близкорасположенных индукторов при нагреве стальных заготовок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 52–59.

14. Жукова А. А., Хоршев А. А., Дзлиев С. В. Согласование индуктора с транзисторным инвертором напряжения при магнитной и немагнитной загрузке // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 5. С. 34–39.

15. Пат. RU 2673437C1. Способ создания твердого поверхностного слоя на детали автосцепки грузового вагона / Р. А. Савушкин, К. В. Кякк, М. И. Тереньев, Ю. А. Безобразов, О. А. Бройтман, С. В. Дзлиев, Ю. Ю. Перевалов; № 2018110172; 22.03.2018. Заявл. 22.03.2018. Опубл. 26.11.2018. Бюл. № 33. 11 с.

16. Пат. RU 2251823С2. Гибкий индуктор для нагрева цилиндрических тел / С. В. Дзлиев, И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло; № 2003117586/09, 10.06.2003, Заявл. 10.06.2003. Опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13. 5 с.

17. Исследование нагрева бандажей роторов турбогенераторов высокочастотным индукционным методом / И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло, С. В. Дзлиев, И. В. Позняк // Электричество. 2003. № 5. С. 23–31.

18. Высокочастотный индукционный нагрев при горячей посадке бандажных колец турбогенераторов и рабочих колес паровых турбин / С. В. Дзлиев, К. Е. Пищалев, Д. М. Жнакин, Ю. Ю. Перевалов // Индукционный нагрев. 2012. № 2. С. 25–28.

19. Высокочастотный индукционный нагрев крупногабаритных деталей / С. В. Дзлиев, К. Е. Пищалев, Д. М. Жнакин, Ю. Ю. Перевалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 5. С. 92–98.

20. Dzliev S V., Pishchalev K. E. High-frequency induction heating of shrink-fitting parts of turbogenerators // Intern. Scientific Electric Power Conf. ISEPC-2019. $C\Pi 6$., 2019. P. 1–7.

21. Хоршев А. А., Цветков И. А., Дзлиев С. В. Повышение КПД индукционного нагрева протяженного изделия с заданным неравномерным теплосъемом // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 5. С. 83–87.

22. Цветков И. А., Дзлиев С. В., Жукова А. А. Индуктор для нагрева трубы из магнитной стали // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 5. С. 88–92.

23. Influence of magnetic steel induction heating power density on inductor resistance range / S. V. Dzliev, A. Khorshev, A. Zhukova, I. Tsvetkov, K. E. Pishchalev // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, 2019. P. 951–954.

24. Induction annealing of pipe weld seams with layed over inductor / S. V. Dzliev, D. N. Bondarenko, M. S. Golubev, K. E. Pishchalev, S. Adoh // Intern. Scientific Conf. «Far East Con». (FEFU). Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2019. P. 1–3.

S. V. Dzliev Saint Petersburg Electrotechnical University

LEADING SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOL «ELECTROTECHNOLOGY» – RESEARCH AND DEVELOPMENT

Describes research directions in the area of high-frequency currents metal treatment and contains samples of technologies and equipment, developed and implemented to production by Interdisciplinary Laboratory «Modern Electrotechmologies» of Academic and Research Center «High-Frequency Electrotechics» of Faculty of Industrial Automation and Electrical Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University in co-operation with «High-Frequency Electrotechnologies Researchand-Development, Education, and Manufacture Center» (INTERM LLC). Main areas of activity are: development of highpower high-frequency transistor convertors; development of automated CNC machines for induction thermohardening of complex-shaped parts, e.g. operating surfaces of railroad automatic couplers, which are scanned first with laser probe to build inductor movement trajectory; development of induction brazing units, e.g. for precision vacuum brazing of multiple beryllium plates on inner chamber surface of ITER project TOKAMAK section; development of technologies and equipmentp for large-sized parts shrink fitting, induction annealing of weld seams, flat welded steel and aluminum decks leveling, pulse thermomechanical treatment of steel parts surfaces, oil heating and many other directions. Programmable control systems are widely used for hardening machines of automatic machines, which allow automatic hardening of high frequency currents of a large range of machine-building parts, additive technologies are introduced for the production of some elements of induction plants, sprayers, current transformers, matching devices, etc. Researches in several directions resulted in equipment producing and commissioning, several resulted in Research-and-Development studies and prototypes building, several still require some researches to be done, Bachelor and Master programs require modernization. All this suggests that preparations are underway for the fourth industrial revolution in the field of induction technologies, and this area will be in demand in the near future, therefore training of highly qualified personnel at a new level plays a special role.

Electrotechnologies, induction heating, metals electromagnetic treatment, oil heating, transistor frequency converters, additive technologies, fourth industrial revolution



Сведения об авторах

Аббакумов Константин Евгеньевич Зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук, профессор. Тел.: (812) 234-37-26

E-mail: keabbakumov@etu.ru

Белов Александр Михайлович Студент гр. 5404 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (921) 773-29-58 E-mail: sana199706@mail.ru

Билецкий Никита Александрович Магистрант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Тел.: +7 (931) 324-56-18 E-mail: mr.biletzky@yandex.ru

Бобриков Иван Сергеевич Студент гр. 4583 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (911) 122-18-56 E-mail: badaki1996@gmail.com

Бузников Анатолий Алексеевич Профессор кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук, профессор. Тел.: +7 (911) 224-97-77 E-mail: aabuznikov@mail.ru

Ваганов Вячеслав Владимирович Доцент, ст. науч. сотр. Высшей школы автоматизации и робототехники, канд. техн. наук. Тел.: +7 (921) 985-45-82 E-mail: vaganov_vv@spbstu.ru

Вагин Антон Владимирович Студент гр. 4583 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (921) 561-34-99 E-mail: av.vagin@bk.ru

Горяинов Виктор Сергеевич Ассистент кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук. Тел.: +7 (921) 977-32-60 E-mail: vsgoriainov@etu.ru

Дзлиев Сослан Владимирович Профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р техн. наук. Тел.: +7 (905) 222-96-45 E-mail: dzlsv@mail.ru Дурукан Ясемин Аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (911) 183-48-33 E-mail: durukanleti@gmail.com Иванов Александр Васильевич Президент Издательско-полиграфической ассоциации высших учебных заведений, д-р техн. наук. Тел.: +7 (921) 912-33-32 E-mail: ivanov.mediabooks@gmail.com Комарова Галина Васильевна Доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук, доцент. Тел.: +7 (921) 655-86-54 E-mail: gvkomarova0404@yandex.ru Костиков Егор Владимирович. Студент гр. 6204 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (914) 209-79-49

Круглов Сергей Александрович Магистрант гр. 5404 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (921) 552-43-12 E-mail: kruglov-s@bk.ru

E-mail: self22@bk.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

Мамыкин Александр Иванович Профессор кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», д-р физ-мат. наук. Тел.: +7 (921) 312-96-79 E-mail: alexmamykin@yandex.ru

Мышко Роман Андреевич Студент гр. 5586 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (963) 340-17-20 E-mail: romanmyshko@gmail.com

Носиров Исмоил Сафарович Аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тел.: +7 (981) 964-42-19 E-mail: nosirov6@mail.ru

.....

.....

Перегудов Александр Николаевич

Доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-37-26 E-mail: a peregudov@mail.ru

Пестерев Иван Сергеевич

Инженер 2-й кат. ГНЦ РФ АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор""», преподаватель-исследователь по специальности «Акустика».

Тел.: +7 (931) 216-33-83 E-mail: ivanpesterev@mail.ru

Степанов Борис Георгиевич

Доцент, ст. научн. сотр. кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук. Тел.: (812) 234-37-26 E-mail: BGStepanov@etu.ru

Хижняков Юрий Николаевич

Профессор кафедры автоматики и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, д-р техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (909) 115-23-06 E-mail: H1941@ yandex.ru Шевелько Михаил Михайлович

Доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук. Тел.: (812) 234-37-26 E-mail: mmshevelko@etu.ru

Шишкина Марина Николаевна

Доцент кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», канд. пед. наук. Тел.: +7 (921) 754-54-26 E-mail: marinash06@mail.ru

Южаков Александр Анатольевич

Зав. кафедрой автоматики и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: +7 (921) 951-90-19 E-mail: uz@at.pstu.ru



INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abbakumov Konstantin Evgen'evich Head of the department of electroacoustics and ultrasonic technology of Saint Petersburg Electrotechnical University, doctor of technical sciences, professor. Phone: (812) 234-37-26 E-mail: keabbakumov@etu.ru

Belov Aleksandr Mikhaylovich Student gr. 5404 of Saint Petersburg Electrotechnical University. Phone: +7 (921) 773-29-58 E-mail: sana199706@mail.ru

Biletsky Nikita Alexandrovich Master's degree of the Saint Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Phone: +7 (931) 324-56-18 E-mail: mr.biletzky@yandex.ru

Bobrikov Ivan Sergeevich Student of gr. 4583 of Saint Petersburg Electrotechnical University. Phone: +7 (911) 122-18- 56 E-mail: badaki1996@gmail.ru

Buznikov Anatoliy Alexseevich

Professor of the department of photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Doctor of technical sciences. Phone: +7 (911) 224-97-77.

E-mail: aabuznikov@mail.ru.

Durukan Yasemin

Postgraduate student, assistant of the department of electroacoustics and ultrasonic technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (911) 183-48-33 E-mail: durukanleti@gmail.com

Dzliev Soslan Vladimirovich

Professor of the department of electrotechnological and conversion equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. Doctor of technical science.

Phone: +7 (905) 222-96-45 E-mail: dzlsv@mail.ru

Goryainov Viktor Sergeevich

Assistant professor of the department of photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of technical sciences.

.....

Phone: +7 (921) 977-32-60

E-mail: vsgoriainov@etu.ru

Ivanov Alexander Vasilyevich President of the Publishing Press Association, doctor of technical sciences. Phone: +7 (921) 912-33-32 E-mail: ivanov.mediabooks@gmail.com

Khizhnyakov Yuri Nikolaevich

Professor of the department of automation and remote control of Perm national research polytechnic university. Doctor of technical sciences, Associate.

Phone: +7 (909) 115-23-06 E-mail: luda @ at.pstu.ru

Komarova Galina Vasilievna

Associate professor of the department of robotics and industrial automation of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of Engineering Sciences. Phone: +7 (921) 655-86-54 E-mail: gvkomarova0404@yandex.ru

Kostikov Egor Vladimirovich

Student gr. 6204 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (914) 209-79-49 E-mail: self22@bk.ru

Kruglov Sergei Alexandrovich

Master gr. 5404 of the department of robotics and industrial automation of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (921) 552-43-12 E-mail: kruglov-s@bk.ru

Kurakina Natalia Igorevna

Associate professor of the department information measuring system and of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of technical sciences. Phone: (812) 234-93-93

E-mail: NKurakina@gmail.com

Mamykin Aleksandr Ivanovich

Professor of the department of physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Doctor of phys.-math. sciences.

Phone: +7 (921) 312-96-79 E-mail: alexmamykin@yandex.ru

Myshko Roman Andreevich

Student gr. 5586 of Saint Petersburg Electrotechnical University. Phone: +7 (963) 340-17-20 E-mail: romanmyshko@gmail.com

.....

Nosirov Ismoil Safarovich

The post-graduate student of the department of robotics and industrial automatic of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (981) 964-42-19 E-mail: nosirov6@mail.ru

Peregudov Aleksandr Nicolaevich

Associate professor of the department of electroacoustics and ultrasonic technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of technical sciences.

Phone: (812) 234-37-26 E-mail: a_peregudov@mail.ru

Pesterev Ivan Sergeevich

Engineer 2 cat. of State Research Center of the Russian Federation – «Concern CSRI «Elektropribor», teacher-researcher specialty «Acoustics».

Phone: +7 (931) 216-33-83 E-mail: ivanpesterev@mail.ru

Shevelko Michail Mikhailovich

Associate professor of the department of electroacoustics and ultrasonic technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of technical sciences.

Phone: (812) 234-37-26 E-mail: mmshevelko@etu.ru

Shishkina Marina Nikolaevna

Assistant professor of the department of physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of pedagogic sciences.

Phone: +7 (921) 754-54-26 E-mail: marinash06@mail.ru

Stepanov Boris Georgievich

Associate professor, senior researcher of the department of electroacoustics and ultrasonic technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. Candidate of technical sciences.

Phone: (812) 234-37-26 E-mail: BGStepanov@etu.ru

Vaganov Vyacheslav Vladimirovich

Senior lecturer, senior researcher of the Higher school of automation and robotics.

Phone: +7 (921) 985-45-82 E-mail: vaganov_vv@spbstu.ru

Vagin Anton Vladimirovich

Student of gr. 4583 Saint Petersburg Electrotechnical University.

Phone: +7 (921) 561-34-99 E-mail: av.vagin@bk.ru

Yuzhakov Alexander Anatolyevich

Head of the department of automatics and telemechanics department of Perm national research polytechnic university. Doctor of technical sciences, associate professor.

Phone: +7 (921) 951-90-19 E-mail: uz@at.pstu.ru



Правила представления рукописей авторами !

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» необходимо представить:

 файлы на CD-диске (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допустима 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; межстрочный 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 6pt.

Рисунки в электронном виде и подписи к ним создаются средствами Word или другими программами (Corel-DRAW, 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, *Puc. 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