

# **ВЕСТНИК**

**МОРСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия**

**Автоматическое управление,  
математическое моделирование  
и информационные технологии**

**Вып. 75/2016**

Вестник Морского государственного университета им. адмирала Г. И. Невельского. Вып. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. Вып. 75/2016 – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016 – 160 с.

**ISBN 978-5-8343-1009-9**

Учредитель журнала – Морской институт  
информационных технологий  
МГУ имени адмирала Г.И. Невельского

Главный редактор д-р техн. наук Дыда А. А.  
Зам. гл. редактора канд. техн. наук Оськин Д. А.

Редакционная коллегия:

Щуров В. А.  
д-р физ.-мат. наук

Веревкин В. Ф.  
д-р техн. наук

Глушков С. В.  
д-р техн. наук

Клоков В. В.  
канд. техн. наук

Павликов С. Н.  
канд. техн. наук

Сгребнев Н. В.  
канд. техн. наук

Буров Д. В.  
канд. физ.-мат. наук

**ISBN 978-5-8343-1009-9**

© Морской государственный университет  
имени адмирала Г.И. Невельского, 2016

*Гончаров Сергей Михайлович,*  
*к. ф.-м. н., доцент, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
*e-mail: sgprim@smtp.ru*

*Михайлов Андрей Геннадьевич,*  
*студент, ДВФУ,*  
*e-mail: quantum722@gmail.com*

*Боршевников Алексей Евгеньевич,*  
*ассистент кафедры ИБ, ДВФУ,*  
*e-mail: LAdG91@mail.ru*

## **ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ СИМВОЛОВ МЫСЛЕННОГО ПАРОЛЯ В ЗАДАЧАХ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

Область технологий биометрической идентификации является динамично развивающейся областью. Это связано с тем, что биометрическая идентификация основывается на неотъемлемых психофизиологических особенностях человека, что обеспечивает относительно удобное их использование в качестве идентификаторов. Различные биометрические характеристики обеспечивают различный уровень безопасности.

Из ряда перспективных видов биометрических характеристик можно выделить электроэнцефалограмму человека (ЭЭГ). На текущий момент в мире достаточно активно проводятся исследования по разработке методов идентификации человека на основе ЭЭГ. При этом используются как различные технологии проведения экспериментов, так и различные математические методы обработки сигналов ЭЭГ [1]. Вероятность ошибки 2-го рода находится в диапазоне от 10% до 0.1% для лучших из этих экспериментов. Одним из решений подобной проблемы является отход от построения классической системы идентификации на основе ЭЭГ и построение системы высоконадежной биометрической идентификации в соответствии с серией стандартов ГОСТ Р 52633 [2].

Ранее уже проводились исследования по построению подобных систем биометрической идентификации [3,4]. При обучении нейросетевого преобразователя из сигнала требуется выделить информативную часть, однако большинство методов обработки сигналов для выделения параметров основаны на том факте, что обрабатываемый сигнал является стационарным. Так как ЭЭГ не является стационарным сигналом, то выделение параметров сигнала в данном случае затруднено.

Для эксперимента было решено использовать потенциал движения мышц глаз [4]. Для обработки полученного сигнала (матрица  $14 \times 1025$ , где 14 – количество каналов нейрогарнитуры), было решено определить локализацию точек в моменты движения глаз. Значения, полученные с электрода, были пропущены через фильтр Баттерворта с полосой пропускания

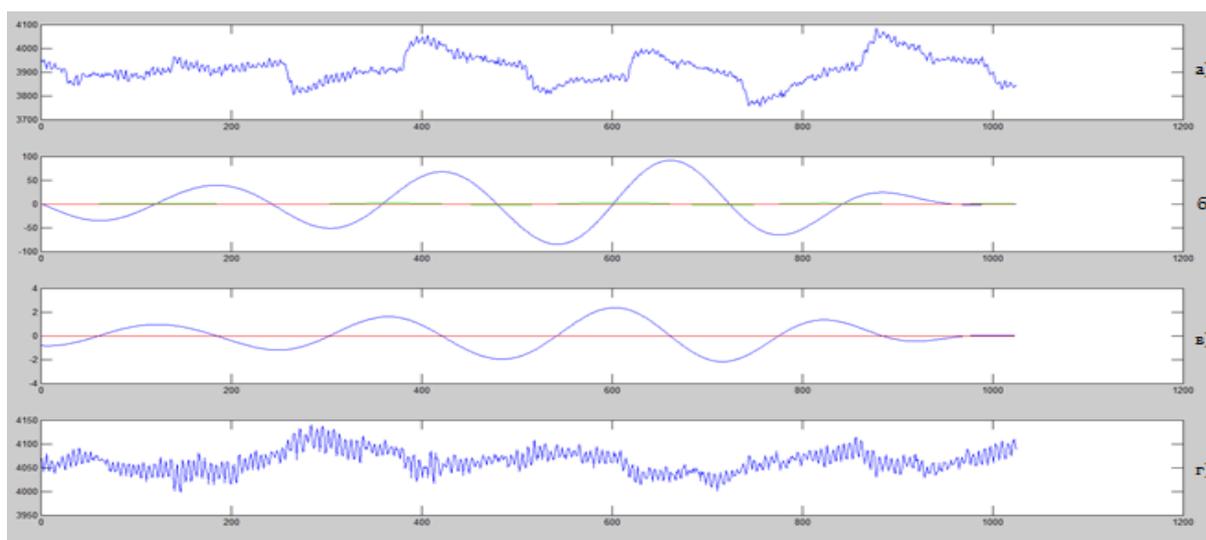
0,16 – 0.6 Гц. Затем полученный массив  $y$  было решено численно продифференцировать. Для этого были составлены конечные разности вида:

$$\Delta y_k = y_k - y_{k+1}, \quad k = \overline{1,1024} \quad (1)$$

Искомыми точками, в моменты движения глаз, будут те значения  $k$ , для которых выполняется:

$$\begin{cases} \Delta y_k \leq 0 \\ \Delta y_{k+1} \geq 0 \end{cases} \text{ или } \begin{cases} \Delta y_k \geq 0 \\ \Delta y_{k+1} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Так как за 1 секунду с нейрогарнитуры регистрируется 64 значений, а PIN-код в данной работе длиной 7 символов, то вектор входных параметров было решено сформировать следующим образом: в информативном канале 2 в окрестностях точек, полученных из информативного канала 1, применялось дискретное преобразование Фурье на интервалах  $k-63$  до  $k+64$  (Рисунок 1). Модуль полученных комплексных коэффициентов для каждого символа пароля объединяется в единый вектор. Данный вектор подается на входы нейросетевого преобразователя.



**Рис. 1.** а) информативный канал 1 б) информативный канал после фильтрации в) производная г) Информативный канал 2

Процедура построения и обучения нейросетевого преобразователя полностью основана на ГОСТ Р 52633.5 с учетом параметров получившихся входных данных [2].

После построения модели преобразователя были проведены исследования по его работе. Исследования по получению злоумышленником секретного ключа длиной 256 бит с помощью преобразователя при известных весовых коэффициентах и при условиях знания истинного или некоторого ложного пароля показывают, что минимальное полученное расстояние Хэмминга составляет 47 (таблица 1). Как показано в таблице уда-

лось увеличить расстояние Хэмминга по сравнению с экспериментом без выделения символа мысленного пароля.

Таблица 1

Расстояние Хэмминга до секретного ключа пользователя в случае знания злоумышленником мысленного пароля

Номер пользователя	Расстояние Хэмминга в эксперименте без выделения символа мысленного пароля	Расстояние Хэмминга в эксперименте с выделением символа мысленного пароля
1	26	103
2	24	83
3	82	71
4	51	47
5	22	70
6	44	67
7	54	83
8	18	90
9	93	56

При этом для всех тестовых образов «свой» преобразователь безошибочно восстанавливал ключ.

Полученные результаты показывают, что обработка данных части биометрического сигнала для выбора биометрических параметров показывает качественно лучший результат по сравнению с обработкой целого сигнала. Дальнейшее исследование в этой области открывает возможности по улучшению качества работы нейросетевого преобразователя "Биометрия - код доступа на основе ЭЭГ".

#### Список литературы

1. Yang S. The Use of EEG Signals For Biometric Person Recognition. Doctor of Philosophy (PhD) thesis // Kent Academic Repository. University of Kent. URL: [https://kar.kent.ac.uk/53681/1/235Thesis%20\(Su%20Yang\).pdf](https://kar.kent.ac.uk/53681/1/235Thesis%20(Su%20Yang).pdf) (дата обращения: 27.01.2016).
2. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия - код доступа: ГОСТ Р 52633.5-2011. – Введен впервые; Введ. 01.12.2011. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.
3. Гончаров С. М., Боршевников А. Е. Построение нейросетевого преобразователя «Биометрия - код доступа» на основе параметров визуального вызванного потенциала электроэнцефалограммы // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники: Научный журнал. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2014. – № 2. – С. 51–55.
4. Гончаров С. М., Боршевников А. Е. Нейросетевой преобразователь «Биометрия – код доступа» на основе электроэнцефалограммы в современных криптографических приложениях. // Вестник СИБГУТИ: – Новосибирск: Изд-во СИБГУТИ, 2016. – № 1. – С. 17–22.

*Громашева Ольга Сергеевна,  
к.т.н., доцент, МГУ им. адм. Г.И.Невельского,  
Каменная Евгения Владимировна,  
аспирант 1-го года обучения, МГУ им. адм. Г.И.Невельского,  
Леонтьева Наталья Андреевна,  
аспирант 2-го года обучения, МГУ им. адм. Г.И.Невельского,  
Щербинина Инна Александровна,  
к.п.н, МГУ им. адм. Г.И.Невельского,  
e-mail: shcherbinina@msun.ru*

## **ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПОДВОДНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ**

Современные технологии использования подводных акустических сенсорных сетей (далее – ПАСС) предлагают новые возможности исследования Мирового океана. Системы мониторинга океанографических параметров, применяемые последние десятилетия, используют традиционную схему сбора данных, основанную на отдельных элементах (станциях, датчиках, специальных океанологических буйах). Каждый отдельный элемент системы наблюдения измеряет и регистрирует данные из окружающей среды и отправляет их на береговую станцию или на судно, используя при этом кабельную или спутниковую связь. В ПАСС эти элементы заменяются на более компактные по габаритам и менее дорогостоящие устройства (сенсорные узлы), которые снабжены множеством датчиков (температуры, солености, давления, скорости и т.д.). При этом связь между подводными сенсорными узлами осуществляется с помощью акустических сигналов.

Применение ПАСС позволяет решать проблемы безопасности судоходства, осуществлять экологический мониторинг, необходимый для понимания причин изменения климата, проводить исследования процессов загрязнения водной среды, наблюдения за популяциями морских животных как на коралловых рифах, так в арктических акваториях. Использование подводных сетей при мониторинге добычи углеводородов с помощью нефтяных платформ, расположенных на шельфе в разных районах Мирового океана, может предотвратить последствия катастроф, связанных с авариями при добыче нефти и газа. Кроме того, данные технологии могут использоваться в системах предупреждения о землетрясениях и цунами.

Необходимо отметить, что сейчас, когда ведутся разработки проектов подготовки к сетецентрическим войнам, важным вопросом применения ПАСС-технологий является их использование в военных целях. Подводная сеть может усилить военные возможности военно-морских ведомств, так как может быть использована для наблюдения, определения местоположения подлодок, организации минных контрмер и операций на вражеской

территории. Последние 5 лет возрос интерес к ПАСС-технологиям Управления военно-морских исследований ВМС США. В стратегически важных районах Мирового океана ВМС США устанавливают системы и средства подводного наблюдения, интегрируемые с носителями морского подводного оружия, компьютерными системами в единой информационно-ударной боевой сети ForceNet [2].

## АРХИТЕКТУРА ПАСС

На данном этапе развития существующие архитектуры ПАСС можно классифицировать по типу движения и по пространственному расположению. По возможности движения архитектуру ПАСС можно определить как:

- стационарные;
- мобильные;
- гибридные системы.

По пространственному расположению архитектуры ПАСС различаются зоной покрытия:

- двухмерные;
- трёхмерные системы.

В стационарных подводных сетях сенсорные узлы установлены на закреплённых буйках или неподвижных платформах морского дна. Стационарные ПАСС используются при мониторинге отдельных акваторий, например гавани, залива или порта.

В мобильных подводных сетях сенсоры могут иметь разные схемы движения. Неуправляемые сенсорные узлы свободно дрейфуют под водой под воздействием различных естественных факторов, например, океанских течений. К таким устройствам относятся дрейфтеры, океанографические и радиоакустические буи, погружные зонды, станции и планеры. Планеры двигаются за счёт аэродинамической подъёмной силы течений, могут менять относительную глубину погружения и преодолевать значительные расстояния благодаря особой конструкции крыльев.

Узлы сети, оборудованные винтовыми устройствами, которые часто называют мобильными, могут передвигаться под управлением инерционных навигационных устройств. Примерами такого оборудования служат автономные подводные АПА и необитаемые подводные аппараты (НПА). Это оборудование применяется в океанологии для измерения данных на различных глубинах океанской среды. Дрейфующие устройства используются на поверхности воды и передвигаются под воздействием ветра и волн, в то время как погружные буи позволяют проводить измерения на нескольких сотнях метров под водой. Погружные буи также дрейфуют в глубинных течениях, но благодаря особенностям конструкции, за счёт изменения параметров плавучести у них есть способность изменять глубину погружения.

В гибридных ПАСС присутствуют и стационарные, и мобильные узлы. В гибридная архитектура подразумевает использование мобильных узлов в качестве приёмника для сбора данных с подводных стационарных сенсорных узлов сети.

Все рассмотренные архитектуры ПАСС используют устройства для измерений на глубине и оправляют полученную информацию на береговую станцию по акустическому каналу, часто использованием спутниковой связи.

При классификации архитектуры ПАСС по пространственному расположению рассматриваются 2-мерные и 3-мерные модели. В двумерной ПАСС все сенсорные узлы располагаются на одной плоскости, занимают положение на заданной глубине: поверхности, на дне или в толще воды.

В трёхмерной ПАСС сенсорные узлы могут располагаться на произвольной глубине. Стационарная подводная сеть подразумевает в основном, двумерную архитектуру, так как сенсорные узлы располагаются на поверхностных буйках или на донных стационарных платформах. Однако, в работе [2] авторы используют стационарные поверхностные буи с привязанными сенсорными узлами, где длина привязки может изменяться, тем самым создавая сеть с трёхмерной архитектурой.

Из-за отсутствия стандартов в системе разработки ПАСС и наличия большого количества специфических приложений, подводные сенсорные сети могут использовать и более сложную архитектуру. Более детальное исследование архитектур подводных сетей связано с использованием схем взаимодействия и методов локализации – определения местоположения отдельных узлов сети. Например, для двумерной стационарной ПАСС с узлами на закреплённых донных платформах, определение локализации не требуется, так как местоположение узлов заранее определено. Для такой же подводной сети, но с узлами, находящимися на поверхности, для локализации может использоваться система GPS. В отличие от стационарных, для мобильных ПАСС необходимо периодическое определение местоположения узлов, но использование методов позиционирования – протоколов локализации – требует относительно высоких расходов. Таким образом, метод локализации зависит от выбора архитектуры. Нужно отметить, что существуют методы определения местоположения, независимые от типа архитектуры.

Решение задачи позиционирования узлов сети – определение местоположения и координация движения подводных узлов сети – необходимо для корректировки полученных данных, локализации опорных точек (маркеров) сети, отслеживания перемещений подводных узлов. Кроме того, информация о локализации элементов сети является основой для протоколов маршрутизации и доступа к данным.

В беспроводных сенсорных сетях локализация проводится на основе данных об измерениях углов и расстояний между узлами сети с использованием следующих методов, основывающихся на:

– индикации уровня принимаемого сигнала, основанного на оценке расстояний, рассчитанных по разнице мощности отправленного и полученного сигналов (предполагается, что свойства передающей среды известны или заданы);

– оценки угла прихода, когда определяется угол между траекторией сигнала и заданным направлением;

– по временной задержке между двумя приходящими сигналами, могут применяться радио- и акустические сигналы;

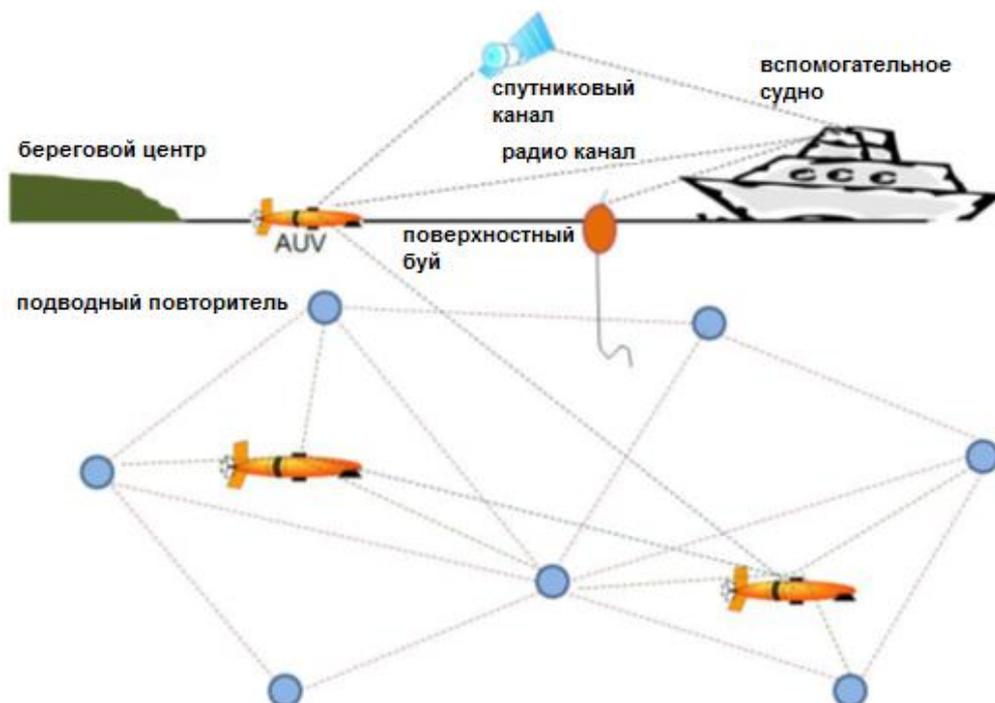
– по времени прихода сигнала, когда используются расстояния, рассчитанные по данным одностороннего измерения дальности и скорости сигналов, приходящих к синхронизированным узлам; при отсутствии синхронизации узлов среднее двухстороннего измерения (полный обход) используется для оценки пути; двухстороннее измерение вычисляется через временную задержку между посылаемым пакетом коротких импульсов и полученным откликом; для метода двухстороннего измерения не нужна синхронизация узлов, однако, для асимметричных каналов этот метод может давать неточные результаты; в наземных беспроводных сенсорных сетях для локализации этим методом используются радиосигналы, дающие возможность проводить точную оценку времени прихода сигналов; значительная скорость распространения сигналов в воздушной среде требует моделирования устройств оценки значений временных значений (таймеров) высокого разрешения, так световой импульс проходит расстояние в 10 метров примерно за 33 наносекунды.

В ПАСС более предпочтителен метод локализации по времени прихода сигнала, так как скорость звука в воде ниже, чем в воздухе. Метод индикации уровня принимаемого сигнала неудобен из-за предсказуемых потерь, а параметры подводного оборудования не могут обеспечить необходимую точность. Использование метода оценки угла прихода в ПАСС не приобрело широкого применения из-за размеров и высокой стоимости направленных антенн. Метод измерения расстояний также недостаточно точен, в нём используют оценочную схему по устранению погрешностей. Широкое распространение получил алгоритм оценивания по методу наименьших квадратов.

Примером реализованной крупномасштабной беспроводной подводной сети является Seaweb. Она разрабатывалась в ВМС США, начиная с 1980х годов. Состоит из автономных подводных аппаратов (АПА), глайдеров (дронов, БПЛА), буёв, усилителей (повторителей) и сопровождающих судов, на которых установлено коммуникационное оборудование для связи по спутнику, телесонару (теле-гидролокатору) или радиоканалу (рис. 1). Телесонар используется для связи под водой, радиоканал только для связи с оборудованием, находящимся на поверхности, спутниковая линия – для связи с береговым командным центром или с кораблём.

В обычных океанографических системах для локализации в основном используют два подхода:

- линия с короткой базой (SBL), когда судно следует за подводным оборудованием и использует коротковолновые акустические излучатели;
- линия с длинной базой (LBL), когда используется любой ретранслятор, установленный на дне или на поверхности в зоне проведения измерений.



**Рис. 1.** Сеть Seaweb в восточной части Мексиканского залива, включающая 3 АПА, 6 узлов повторителя и 2 поверхностных буя

Оба метода не нашли применения в ПАСС, так как LBL использует длинноволновые сигналы, которые создают помехи и не подходят для коммуникации между подводными сенсорными узлами, а для SBL необходимо обеспечивающее судно, что неприменимо для крупномасштабных мобильных ПАСС.

В настоящее время идут разработки альтернативных методов. Например, интеллектуальный буй с GPS (GIB), разработанный для слежения за отдельными элементами системы (АПА, дайверами и др.). GIB оснащены приёмником GPS и гидрофоном, которые принимают сигналы от устройств и оценивают расстояние до них по задержкам времени прихода сигнала. С заданной периодичностью GIB отправляют вычисленные расстояния и свои координаты на центральный управляющий пост, где рассчитывают местоположение оборудования с точной географической привязкой. Центральный пост управления может быть расположен либо на берегу, либо на сопровождающем судне. Интеллектуальный буй GIB не подходит для применения в ПАСС по нескольким причинам. Во-первых, подводные устройства должны постоянно излучать сигналы, чтобы их отследил буй, что очень затратно по энергоресурсам, особенно при излучении

длинноволновых сигналов. Во-вторых, при использовании коротковолновой связи требуется большое количество буев. В данном случае GIB только посылает на центральный пост значения расстояний между элементами системы, но в силу односторонности канала передачи информации не имеет возможности обмениваться данными о локализации с узлами сети.

### **Проблемы ПАСС и подводной коммуникации**

Применение акустических сигналов для связи между подводными сенсорными узлами определяется многими факторами. Под водой радиосигналы быстро затухают и распространяются только на короткие расстояния. При использовании радиосигналов необходимо, чтобы узлы ПАСС находились близко к поверхности морской воды, хотя недавние исследования показали перспективы использования радиосигналов глубоко под водой. Оптические модемы могут достигать скорости передачи данных до нескольких Мб/с на расстояние около 100 м только при высокой прозрачности водной среды. Однако на практике тяжело создать такие условия, и оптические сигналы подвергаются поглощению и рассеиванию на больших расстояниях.

По сравнению с радио- и оптическими сигналами акустические сигналы затухают медленнее и могут преодолевать большие расстояния. Скорость распространения звука в морской среде по сравнению со скоростью звука в воздухе значительно выше ( $\approx 1500$  м/с), поэтому можно провести достаточно точные измерения задержки прихода сигналов. Значения скорости звука в воде зависит в основном от плотности воды и её температуры, поэтому характеризуется пространственно-временной изменчивостью. Акустическое информационное поле является одним из наиболее эффективных полей, поэтому связь по акустическому каналу наиболее подходит для подводной коммуникации. Однако пропускная способность акустического канала небольшая, следовательно, скорость передачи данных достаточно низкая. Скорость передачи данных может быть увеличена, если использовать близкодействующую коммуникацию, при которой потребуются большое число сенсорных узлов, чтобы достичь определённого уровня подключения и площади охвата. В этом случае ПАСС только усложняет коммуникацию и работу сетевых протоколов. Более того, акустический канал обладает низким качеством связи из-за многолучевого распространения и временной изменчивости характеристик передающей среды. Не менее сложной проблемой является то, что в мобильных подводных сетях относительное движение передатчика и приёмника может привести к возникновению эффекта Доплера. Важной технической задачей является повышение ограниченного энергоресурса ПАСС.

Из-за этих сложностей, подводные сети нуждаются в разработке новых доступов к носителям, новых типов соединения и видов транспортировки. Методологически необходимы новые проекты локализации, прото-

колов синхронизации и архитектур. Существует много вариантов сетевых протоколов и протоколов управления, которые тесно связаны с сетевой архитектурой.

Характеристики акустического канала могут быть описаны в зависимости от различных параметров.

Обозначим  $W_a$  мощность акустического излучения источника звука. Для ненаправленного источника

$$W_a = \frac{2\pi P_1^2}{\rho c},$$

где  $P_1$  – амплитуда давления, создаваемого источником на расстоянии 1 м. Отсюда

$$P_1 = \sqrt{\frac{W_a \rho c}{2\pi}}.$$

Амплитуда сигнала при распространении на расстояние  $R$  уменьшается как вследствие расхождения фронта волны, так и вследствие частотно зависящего затухания звука в морской среде. Ослабление сигнала за счёт расхождения фронта волны учитывается коэффициентом  $\frac{\sqrt{F(R)}}{R}$ , где  $F(R)$  – фактор фокусировки для луча, по которому распространяется сигнал. Если расстояние измеряется в км, то этот коэффициент будет равен  $\frac{\sqrt{F(R)}10^{-3}}{R}$ .

Ослабление сигнала из-за затухания звука описывается коэффициентом затухания

$$\beta(f_0) = 0,036 f_0^{3/2} \text{ дБ/км},$$

где  $f_0$  – несущая частота сигнала в кГц.

Таким образом, уменьшение амплитуды сигнала вследствие затухания можно учитывать коэффициентом  $10^{-0,0018 f_0^{3/2} R}$ .

На практике часто используются выражения для оценки коэффициента поглощения  $a(f)$ , найденные эмпирически:

– для заданных значений частоты  $f$  в диапазоне нескольких сотен Гц:

$$10 \log_a(f) = 0,003 + 0,11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2,75 \cdot 10^{-4} f^2$$

– для низких значений частоты  $f$ :

$$10 \log_a(f) = 0,002 + 0,11 \frac{f^2}{1+f^2} + 0,011 f^2$$

где  $f$  даётся в кГц и  $a(f)$  измеряется в дБ/км.

Для передачи информации на большие расстояния (10-100 км) в ПАСС пропускная способность акустического канала ограничена несколькими кГц. Для меньшего (1-10 км), она достигает десятков кГц. При дистанциях менее 100 метров пропускная способность достигает сотен кГц.

Из-за низкой пропускной способности акустического канала, скорость передачи данных также невелика. Максимально достижимая скорость передачи данных в акустическом канале ограничена диапазоном примерно 40 км/кбит. В настоящее время исследуются коротко-диапазонные акустические модемы с улучшенной модуляцией для увеличения скорости передачи данных в ПАСС.

Акустический канал также подвержен влиянию многолучевого распространения акустического сигнала и временной изменчивости водной среды. Главной причиной возникновения многолучевого распространения является отражение от морской поверхности и дна, а также стратификация морской среды. К тому же, колебания температуры и проводимости (солёности) формируют слоистую структуру водной среды. Границы раздела слоёв обладают отражающими и преломляющими свойствами и способствуют возникновению многолучевого распространения/рассеивания. Временная изменчивость, в основном, возникает из-за поверхностных волн, которые смещают точки отражения. В результате низкое качество связи приводит к высокому уровню коэффициента ошибок по битам (BER). BER может достигать значений, равных  $10^{-2}$ , хотя в новых акустических модемах этот показатель меньше. Качество связи акустического канала зависит также от направления коммуникации (горизонтального или вертикального) и от глубины размещения сети. Причём, вертикальный канал меньше подвержен рассеиванию, чем горизонтальный, а на мелководье рассеивание более выражено из-за морского дна и поверхности.

К перечисленным выше проблемам в мобильных подводных системах добавляются следующие сложности:

– подвижность сенсорных узлов может вызвать эффект Доплера, возникающий при относительном движении приёмника и передатчика; мобильные платформы, такие как АПА, способны двигаться со скоростью в несколько морских узлов, в то время как неуправляемые дрейфующие устройства двигаются со скоростью морских течений, скорость которых зачастую меньше 1 морского узла;

– мобильность приводит к большим затратам энергоресурсов и высокой стоимости системы; эффективное использование энергии должно обеспечивать работоспособность оборудования на протяжении нескольких недель и месяцев, пока блоки питания (аккумуляторы, батареи) устройств не будут перезаряжены и направлены на новый этап мониторинга.

Таким образом, задача разработки архитектуры подводной акустической сенсорной сети, актуальна для успешного освоения энергетических, минеральных и биологических ресурсов Мирового океана, повышения безопасности морского судоходства, защиты акваторий портов.

#### Список литературы

1. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Л.Ю.Бочаров Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 304с.

2. Материалы международной конференции «Инжиниринг & Телекоммуникации - En&T 2014» 26 ноября 2014 г., МФТИ

3. В. В. Коваленко, В. Ю. Корчак, А. И. Хилько, В. Л. Чулков Вопросы противодействия сетевым системам подводного наблюдения и обеспечения их безопасности – *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2015. Т. 8, № 4

4. Громашева О.С., Бачинский К.В., Кошелева А.В и др. Определение взаимосвязи изменения параметров акустических сигналов и гидрофизических характеристик морской среды / *Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана: в 2кн. / ТОИ ДВО РАН Кн.2. – Владивосток: Дальнаука, 2013. с.241-251.*

УДК 519.22:004.67

***Клюева Светлана Федоровна,***

*к.т.н., доцент кафедры АИС, МГУ им. адм. Г.И.Невельского,*

*e-mail: klsvetkl@gmail.com*

## **АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ ГЛУБИН МОРСКОГО ДНА**

В данной работе рассмотрен гибридный алгоритм кластеризации цифровой карты глубин морского дна. Кластеризация проведена на базе метрики, учитывающей расстояние между объектами карты и значение разности глубин. Исследование разношкальных метрик имеет особое значение для анализа многомерных данных. В этих случаях метрика строится на основе коэффициентов Гауэра [1-2]. Общие подходы, разработанные в классических алгоритмах кластеризации: FOREL, k-means, иерархической кластеризации [1-4], использованы при разработке алгоритма кластеризации рассмотренного в данной работе. Кластеризация может быть использована в системах навигации по полю глубин морского дна для анализа поля глубин и автоматизации формирования маршрута движения судна с учетом структуры морского дна.

### **Постановка задачи**

Цифровая карта глубин (далее – ЦКГ) представлена матрицей  $H = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i, i = \overline{1, N}\}$ , при  $h_i > 0$  – задана глубина морского дна, при  $h_i \leq 0$  – высота (суша),  $0 < h_i \leq h_m$  – мели,  $h_m$  – предельная безопасная глубина.

Для точек ЦКГ  $a_i = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i\}$ ,  $a_i \in H$  и метрики  $\mu_{c_k}$  – область моря ( $\mu_{L_l}$  – суша) проводят разбиение точек на непересекающиеся подмножества  $S_k$  (кластеры моря) и  $L_l$  (кластеры суши), так чтобы каждый кластер состоял из точек, близких по метрике  $\mu_{c_k}$ , а объекты разных кластеров суще-

ственно различались, при этом каждому объекту  $a_i \in H, h_i > 0$  приписывается метка (номер) кластера  $C_k$ , и каждому объекту  $a_i \in H, h_i \leq 0$  приписывается метка (номер) кластера  $L_l$ . Метрика кластеризации определена с учетом расстояния и разности глубин:

$$\mu_{c_k} = d_\rho \cdot \rho\left(\varphi_i^{c_k}, \lambda_i^{c_k}\right) + d_h \cdot \left| h_i^{c_k} - h_{c_k} \right|, \quad (1)$$

где  $d_\rho, d_h$  – коэффициенты по расстоянию и глубине (высоте).

$(\varphi_i, \lambda_i)$  – координата точки  $a_i \in H$  ЦКГ;

$(\varphi_{c_k}, \lambda_{c_k})$  – координата центраида  $c_k \in C$ ;

$\rho^2(\varphi_i^c, \lambda_i^c) = (\varphi_i - \varphi_c)^2 + (\lambda_i - \lambda_c)^2$  – расстояние между точками и центроидом  $c_k = c$ .

Кластеры моря  $C_k = \{ \varphi_i, \lambda_i, h_i / h_i > 0, h_k > 0, \mu_{c_k} \rightarrow \min \}$ ,

кластеры суши  $L_l = \{ \varphi_l, \lambda_l, h_l / h_l \leq 0, h_l \leq 0, \mu_{L_l} \rightarrow \min \}$ .

Оптимальность разбиения объектов кластеризации на группы оценивается при помощи функционала качества кластеризации.

В качестве критерия качества кластеризации можно выбрать сумму средних внутрикластерных расстояний и сумму межкластерных расстояний.

Сумма средних внутрикластерных расстояний должна быть минимальной [1-4 ]:

$$F_0 = \sum_{c \in C} \frac{1}{|C_k|} \sum_k \mu_c^2 \rightarrow \min,, \quad (2)$$

где  $C_k = \{ a_i \in H / c_k = c \}$  – кластер с номером  $k$ .

Сумма межкластерных расстояний должна быть максимальной:

$$F_1 = \sum_{c \in C} \mu^2(\mu_c, \mu) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $\mu$  – центр масс всей выборки. При этом вычисляется отношение пары функционалов, чтобы учесть межкластерные и внутрикластерные расстояния:

$$F_0 / F_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

На основе поставленной задачи реализован гибридный алгоритм кластеризации, включающий элементы алгоритмов FOREL, k-means и иерархической кластеризации.

## Алгоритм кластеризации

Алгоритм кластеризации включает два основных этапа. На первом этапе происходит построение центроидов кластеров. Первоначально центроиды задаются на узлах регулярной сетки. Затем происходит оптимизация числа и положения центроидов на базе метрики (1). На втором этапе происходит кластеризация точек цифровой карты.

1. Этап оптимизации центроидов.

Шаг 0. Считать данные из сформированного файла центроидов,  $K$  – число центроидов.

*Внешний цикл:*

Шаг 1. Выбрать центроид  $C_i$  (первый раз  $i = 0$ ), пока  $i < N$ .

*Внутренний цикл:*

Шаг 2. Выбрать центроид  $C_j$ , (первый раз  $j = i + 1$ ), пока  $j < N$ . Иначе перейти на шаг 6.

Шаг 3. Если расстояние по широте или долготе между центроидами  $c_j$  и  $c_i$  больше предельного  $\Delta d: \left( \rho(\varphi_{c_i}^{c_j}, \lambda_{c_i}^{c_j}) - \Delta d \right) > 0$ , и  $\left| h_{c_i} - h_{c_j} \right| > \Delta h$ , или глубины разного знака, то центроид  $c_j$  рекомендовано не изменять, в противном случае центроид  $c_j$  помечается на исключение.

Шаг 4. Исключить помеченный центроид  $c_j$  из множества центроидов  $C$ , соответственно пересчитать число кластеров  $K_1$  (первоначально  $K_1 = K$ ).

Шаг 5.  $j = j + 1$ , перейти к шагу 2.

*Внутренний цикл завершен.*

Шаг 6. Принять  $i = i + 1$  и перейти на шаг 2, пока  $i < K$ .

*Внешний цикл завершен.*

Шаг 7. Сформировать файл центроидов.

2. Этап кластеризации точек ЦКГ.

Шаг 0. Выбрать начальную точку ЦКГ  $a_i$ ,  $i = 0$ .

*Внешний цикл:*

Шаг 1. Переход по точкам  $a_i$  карты пока  $i < N$ .

*Внутренний цикл:*

Шаг 2. Переход по центроидам  $c_k$  пока  $k < K_1$ .

Шаг 3. Вычислить значение метрики (1). Принять за минимум значение метрики.

Шаг 4. Перейти к следующему центроиду  $c_{k+1}$ . Вычислить метрику. Если значение метрики меньше полученной ранее, принять за минимум. Перейти на шаг 2.

*Внутренний цикл завершен.*

Шаг 5. Отнести точку  $a_i$  карты к кластеру  $C_k$  с минимальной метрикой.

Шаг 6. Если величина метрики больше порогового значения, то данная точка образует свой собственный кластер (отличные значения глубины).

Шаг 7.  $i = i + 1$ , перейти на шаг 1.

Внешний цикл завершен

Шаг 8. Вычислить критерии качества – условия (2)-(4).

Шаг 9. Вычислить центр группирования точек  $\mu$  для каждого кластера  $c_i$ , среднюю величину глубины (или высоты) и выполнить перенос центра кластера  $c_i$  в заданную точку  $\mu$ .

Шаг 10. Вычислить критерии качества  $F_0$ ,  $F_1$  и отношение данных критериев. Принять решение: продолжить итерации или останов. В случае продолжения процесса кластеризации перейти на шаг 1. Иначе кластеризация закончена.

### Реализация алгоритма кластеризации

Задан район плавания (рис. 1). Точки данного района не регуляризованы.

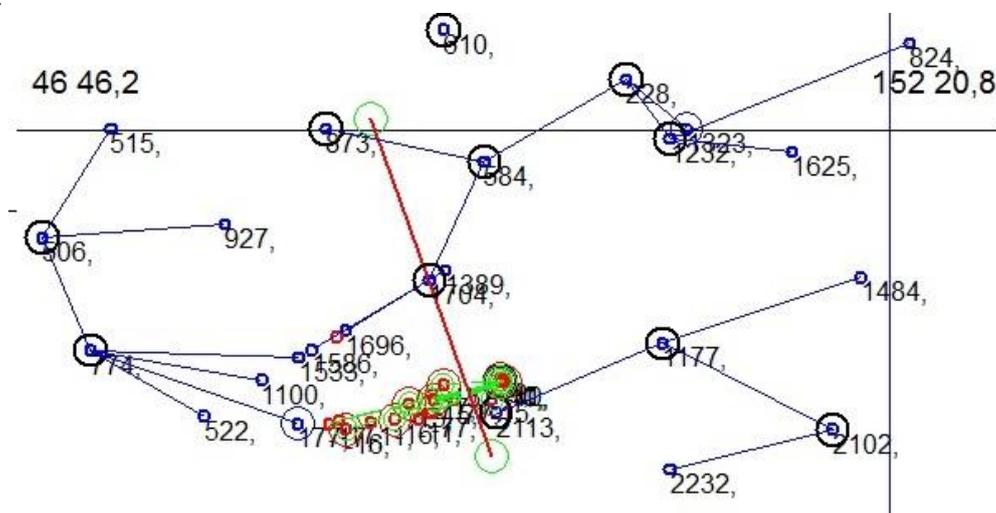


Рис. 1. Реализация кластеризации ЦКГ района Охотского моря

Выполнена кластеризация по метрике (1), где  $d_p = 0.25$  и соответственно  $d_p = 0.75$ .

Критерий качества определен в соответствии с выражениями (2)-(4). Сумма средних внутрикластерных расстояний:

$$F_0 = \sum_{c \in C} \frac{1}{|K_c|_{c_i=c}} \sum \mu_c^2 = 18.43 \text{ (мили)}$$

Сумма межкластерных расстояний:

$$F_1 = \sum_{c \in C} \mu^2(\mu_c, \mu) = 24.96 \text{ (мили)}$$

Отношение  $F_0 / F_1 = 0.738$ .

Для данного района, при небольшом числе точек, целесообразнее применять алгоритм иерархической кластеризации.

### Реализация кластеризации для сложных районов плавания

На рис. 2 приведен район Японского моря. Точки ЦКГ регуляризованы. Показан маршрут движения судна,  $S_0$  начальная и  $S_n$  конечная точки. Кластеризация точек ЦКГ позволяет выполнить анализ района плавания, для планирования маршрута перехода из начальной точки в конечную, с учетом среднего уровня глубин, мелей и суши.



Рис. 2. Район Японского моря

Кластеризация данных ЦКГ района Японского моря отображена на рис. 3.

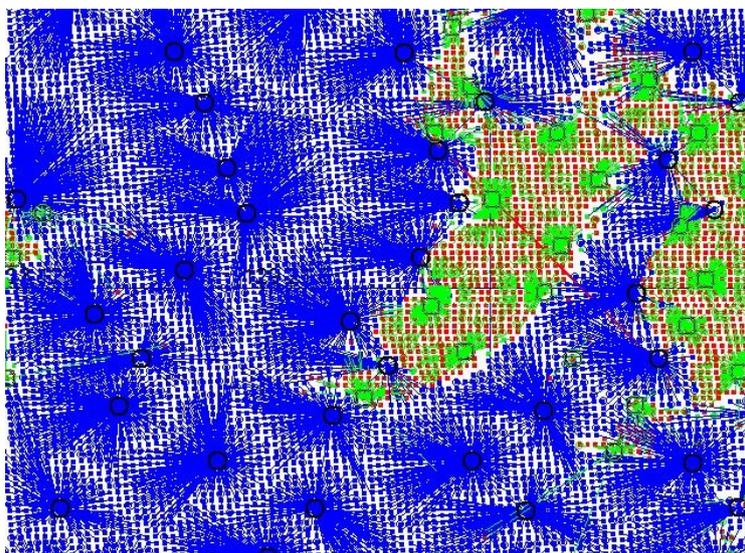


Рис. 3. Кластеризация района Японского моря

В данном алгоритме заранее не определено число кластеров. Расчеты критериев качества кластеризации в соответствии с выражениями (2) и (3) приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

## Критерии качества кластеризации

Район плавания	Внутрикластерный критерий	Межкластерный критерий	Отношение $F_0/F_1$
Район Охотского моря	18.43	24.96	0.738
Уссурийский залив.	83.86	4128.50	2.03E-02
Японское море.	22.819	1021.96	2.23E-02

Для больших по объему данных районов плавания значение критерия оценки межкластерных расстояний велико, потому можно перейти к оценке качества кластеризации с учетом средних сумм внутрикластерных расстояний и межкластерных расстояний:

$$F_0 = \frac{1}{K} \sum_{c \in C} \frac{1}{|K_c|} \sum_{c_i = c} \mu_c^2, \quad (5)$$

$$F_1 = \frac{1}{K} \sum_{c \in C} \mu^2(\mu_c, \mu) \quad (6)$$

Таблица 2

## Критерии качества кластеризации с учётом средних сумм

Район плавания	Внутрикластерный критерий, средняя величина	Межкластерный критерий, средняя величина	Отношение $F_0/F_1$
Район Охотского моря	1.84	2.495	0.738
Уссурийский залив	1.55	76.45	2.03E-02
Японское море	0.362	16.22	2.23E-02

Отношение (4) для выражений (2), (3) и (5), (6) практически совпадают, т.е. можно использовать приведённые критерии для оценивания качества кластеризации в зависимости от объема исходных данных. В результате кластеризации формируются кластеры однородных областей моря, суши и мелей, как показано на рис. 2. Причём для предварительного анализа больших областей можно использовать «крупные кластеры», со средними величинами глубин. Для более детального анализа выделенных областей, следует использовать «мелкие кластеры», которые строятся поверх регулярной сетки данных, и шаг оптимизации равен шагу сетки, в то время как в первом случае, использован шаг оптимизации в 3-4 (и более) раза превышающий шаг регулярной сетки. Вычислительные затраты во втором случае значительно выше, общая вычислительная сложность оценивается как  $O(KN)$ .

## Выводы

На основе разработанного алгоритма проведена кластеризация глубин района плавания с использованием меры «близости» объектов по расстоянию и значению глубины. Разработанный метод является гибридным методом кластеризации, учитывающий особенности обработки навигационной информации. Данный алгоритм может быть использован в системах навигации по глубинам морского дна.

### Список литературы

1. Bilel Ben Ali, Youssef Massmoudi. K-Means clustering based on Gower Similarity Coefficient: A comparative study // Conference Paper published Apr 2013 in 2013 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), pp 1-5. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6552669>
2. Gower J. C. A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties // Biometrics, Vol. 27, No. 4 (Dec., 1971), pp. 857-871. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2528823>.
3. Savchuka T. O., Petrishyna S. I., Piotr Kisała. Information technology of clustering problem situations in computing and office equipment / T. O. Savchuka, S. I. Petrishyna, Piotr Kisała, Baglan Imanbek, Saule Smailova // Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161W (December 18, 2015). [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2478663>
4. Stefan Atev, Grant Miller, Nikolaos P. Papanikolopoulos Clustering of Vehicle Trajectories // IEEE transactions on intelligent transportation systems, vol. 11, no. 3, Sep. 2010.

УДК 656.61.052.65.011.56 (0.75.8)

**Комаровский Юрий Александрович,**

*к.т.н., консультант НИИ МТ МГУ им. Г.И. Невельского*

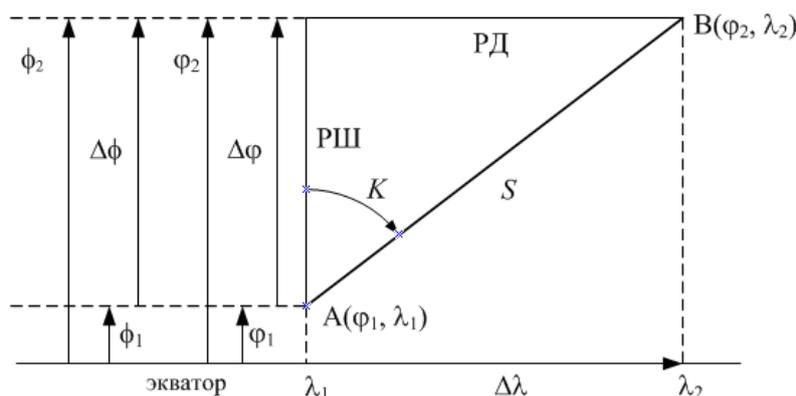
*[rss.ilyukhina@gmail.com](mailto:rss.ilyukhina@gmail.com)*

## ТОЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИЗОМЕТРИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ НА НОВОМ ОТЕЧЕСТВЕННОМ РЕФЕРЕНЦ-ЭЛЛИПСОИДЕ ГСК-2011

После отмены в 2000 году режима избирательной доступности точность определения геодезических координат судовыми приёмниками спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS непрерывно увеличивается. Происходит это вследствие совершенствования аппаратуры навигационных спутников и судовых приёмников, а также вследствие разработки и внедрения более точных алгоритмов обработки спутниковой навигационной информации и вычисления координат потребителей. Другим направлением повышения точности координат служит совершенствование модели Земли. Во второй половине минувшего столетия во всём мире разрабатывались и принимались новые общеземные эллипсоиды. С 1-го января 2017 года в нашей стране вводится в действие новая геодезическая система координат ГСК-2011 с одноименным референц-эллипсоидом [1]. В связи с

этим возникает необходимость разработки новых алгоритмов получения высокоточных величин, используемых для решения навигационных задач. Цель предлагаемой статьи заключается в разработке способа таких вычислений изометрической широты.

В морском судовождении главным образом используются электронные и бумажные карты меркаторской проекции, с помощью которых ведётся графическое счисление пути судна, определяются координаты судна, а также вычисляются локсодромические направления и расстояния. Эти величины в меркаторской проекции определяются через изометрические широты. Поясним это рис. 1.



**Рис. 1.** Локсодромический треугольник

На рис. 1 изображён участок карты меркаторской проекции, на которую нанесены точки А и В с геодезическими координатами  $(\phi_1, \lambda_1)$  и  $(\phi_2, \lambda_2)$  соответственно. Расстояние  $S$  между точками является локсодромическим расстоянием, которое определяется в морских милях как  $S = \Delta\phi / \cos K = (\phi_2 - \phi_1) / \cos K$ .

Локсодромический курс  $K$  с высокой точностью вычисляется с использованием изометрических широт  $\phi_1$  и  $\phi_2$ . Изометрической широтой  $\phi$  называется дуга меридиана, выраженная в экваториальных минутах данного референс-эллипсоида, отсчитываемая от экватора до параллели геодезической широты  $\phi$ . В отечественной навигационной практике изометрическую широту часто называют меридиональной частью (МЧ) и обозначают её латинской буквой  $D$ . Отсюда искомый курс вычисляется в четвертном счёте с помощью следующей формулы:

$$K = \arctg \left( \frac{\Delta\lambda}{\Delta\phi} \right) = \arctg \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\phi_2 - \phi_1} \right),$$

что следует из уравнения локсодромии [2]

$$(\lambda_2 - \lambda_1) = \operatorname{tg} K (\phi_2 - \phi_1),$$

где изометрическая широта  $\phi$  может быть представлена как функция геодезической широты  $\phi$  и первого эксцентриситета референс-эллипсоида  $e$ ,

$$\phi = \ln \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{1 - e \sin \phi}{1 + e \sin \phi} \right)^e} \right].$$

Используя результаты работы [3], запишем выражение для  $\Delta\phi$ , в котором вместо  $\phi_2$  фигурирует  $\phi_1 + \Delta\phi$ .

$$\Delta\phi = \ln \left[ \frac{\operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_1 + \Delta\phi}{2} \right)}{\operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_1}{2} \right)} \right] + \frac{e}{2} \ln \left[ \frac{(1 - e \sin(\phi_1 + \Delta\phi))(1 + e \sin \phi_1)}{(1 + e \sin(\phi_1 + \Delta\phi))(1 - e \sin \phi_1)} \right]. \quad (1)$$

Выражения в скобках формулы (1) при малой разности широт будут близки к 1. Поэтому работа с этой формулой требует высокой разрядности вычислений. Формула (1) даёт удовлетворительные результаты при больших  $\Delta\phi$  и  $\phi_1 > 45^\circ$ . Здесь необходимо помнить о том, что изометрические широты в практическом судождении не вычисляются при геодезических широтах более  $70^\circ$ . Тем не менее, высокая точность вычислений достижима, если изометрические широты рассчитывать отдельно, а после этого получать их разность. Для этого позаимствуем расчётную формулу меридиональной части из [4],

$$\phi = N \ln \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \left( \frac{1 - e \sin \phi}{1 + e \sin \phi} \right)^{\frac{e}{2}} \right], \quad (2)$$

где  $N$  – число экваториальных минут в большой полуоси референц-эллипсоида данной геодезической системы координат,  $N = 3437,74677079$ .

В табл. 1 приведены параметры нового отечественного референц-эллипсоида ГСК-2011. А для сравнения даны параметры референц-эллипсоидов Красовского и WGS-84. В основе геодезической системы СРНС Навстар GPS лежит референц-эллипсоид WGS-84.

Таблица 1

Параметры референц-эллипсоидов [1,5,6]

Параметр	Р-э Красовского	Р-э ГСК-2011	Р-э WGS-84
Большая полуось, м	6378245	6378136,5	6378137
Знаменатель сжатия	298,3	298,2564151	298,257223563
Эксцентриситет $e$	0,08181333	0,0818193015	0,0818191908
Экваториальная миля, м	1855,356262	1855,324701	1855,324846

Сравнение данных табл. 1 позволяет сделать вывод о существенных отличиях параметров нового отечественного референц-эллипсоида ГСК-2011 от ещё используемого до конца 2016 года референц-эллипсоида Красовского. Налицо близость параметров систем WGS-84 и ГСК-2011.

Вводимая ГСК-2011 является геоцентрической экваториальной прямоугольной системой координат. С её помощью определяется положение точки относительно центра масс Земли. Главной отсчётной плоскостью

служит плоскость экватора. Отсчёт координат точек осуществляется в правосторонней пространственной декартовой системе координат. Пространственные прямоугольные координаты выражаются в линейной мере. Они численно равны отстояниям определяемой точки от соответствующих координатных плоскостей. Начало отсчёта координат совпадает с центром масс Земли. Главная плоскость ОХУ совмещена с плоскостью экватора. Главная ось Z в ГСК-2011 совпадает с осью вращения Земли и направлена в сторону Северного полюса. Ось X принадлежит одновременно плоскости экватора и плоскости начального меридиана. Ось Y лежит в плоскости экватора и дополняет систему XYZ до правой системы координат. Отсюда следует вывод о существенном отличии действующей системы координат Пулково-42 от вводимой с 1-го января 2017 года ГСК-2011. Поэтому крайне важно накануне ввода новой системы геодезических координат внедрить в навигационный обиход новые алгоритмы высокоточных вычислений изометрических широт, что стимулируется широким применением СРНС. Использование традиционных таблиц меридиональных частей МТ-2000 уже не удовлетворяет точности определения координат, достигаемой с помощью СРНС Навстар GPS и Глонасс. Кроме того, работа с таблицами МТ-2000 требует ручных выборок и интерполяций, что нельзя признать технологичными с точки зрения эффективности вычислительных процедур. Для достижения поставленной цели представим выражение (2) в виде следующего ряда:

$$\begin{aligned} \phi = N \ln 10 \lg \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - \\ - N \left[ e^2 \sin \varphi + \frac{e^4}{3} \sin^3 \varphi + \frac{e^6}{5} \sin^5 \varphi + \frac{e^8}{7} \sin^7 \varphi + \dots \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\ln 10 = 2,3025850929$ , а произведение  $M \ln 10 = 7915,70446789$  и будет одинаково для всех референц-эллипсоидов.

Величина коэффициента  $(Ne^8)/7$  последнего слагаемого в квадратных скобках ряда (3) не превосходит 0,000000985. Поэтому его и последующие за ним слагаемые можно опустить без ущерба для точности вычислений и ограничиться только первыми тремя слагаемыми. Отсюда сумма в квадратных скобках, пригодная для вычислений, примет иной вид,

$$Ne^2 \sin \varphi + \frac{Ne^4}{3} \sin^3 \varphi + \frac{Ne^6}{5} \sin^5 \varphi . \quad (4)$$

Расчёты по формуле (4) сопряжены с одним неудобством, которое заключается в необходимости привлечения вычислительных средств с высокой разрядностью, требуемой для получения значений высоких степеней синусов. Поэтому преобразуем выражение (4) путём замены синусов со степенями 3 и 5 на синусы кратных углов по формулам биномиальных коэффициентов [7],

$$\sin^3 \varphi = \frac{3}{4} \sin \varphi - \frac{1}{4} \sin 3\varphi, \quad \sin^5 \varphi = \frac{5}{8} \sin \varphi - \frac{5}{16} \sin 3\varphi + \frac{1}{16} \sin 5\varphi.$$

Сделаем подстановку полученных выражений в формулу (4), после чего получим

$$N \left( e^2 + \frac{e^4}{4} + \frac{e^6}{8} \right) \sin \varphi - N \left( \frac{e^4}{12} + \frac{e^6}{16} \right) \sin 3\varphi + \frac{Ne^6}{80} \sin 5\varphi.$$

Введём следующие обозначения:

$$k_1 = N \left( e^2 + \frac{e^4}{4} + \frac{e^6}{8} \right), \quad k_3 = N \left( \frac{e^4}{12} + \frac{e^6}{16} \right), \quad k_5 = \frac{Ne^6}{80}.$$

Последнее слагаемое получает максимальное значение  $k_5 = 0,000012$  при  $\varphi = 18^\circ$ , когда  $\sin 5\varphi = 1$ . Поэтому исключение последнего слагаемого при  $k_5$  не повлияет на точность вычисления изометрической широты. Тогда с учётом введённых обозначений формула (3) примет иной вид, удобный для вычислений.

$$\varphi = 7915,7044681 \lg \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - k_1 \sin \varphi + k_3 \sin 3\varphi. \quad (5)$$

Рассчитанные с высокой разрядностью коэффициенты  $k_1$  и  $k_3$  референц-эллипсоида ГСК-2011 помещены в табл. 2. Там же можно видеть коэффициенты  $k_1$  и  $k_3$  референц-эллипсоидов Красовского и WGS-84.

Таблица 2

Коэффициенты для расчёта изометрических широт

Коэффициент	Р-э Красовского	Р-э ГСК-2011	Р-э WGS-84
$k_1$	23,04892	23,05229	23,05223
$k_3$	0,01289	0,0129	0,0129

Из табл. 2 следует, что у всех референц-эллипсоидов величины коэффициента  $k_3$  одинаковы. Не отличаются коэффициенты  $k_1$  у референц-эллипсоидов WGS-84 и ГСК-2011. Следовательно, изометрические широты (меридиональные части) на референц-эллипсоидах WGS-84 и ГСК-2011 можно вычислять по одним и тем же формулам.

Если использовать формулу (5) и коэффициенты табл. 2, то можно полностью отказаться от таблиц меридиональных частей и вычислять изометрические широты с точностью не хуже  $0,0001'$  даже на инженерных микрокалькуляторах с малой разрядностью.

#### Список литературы

1. Правительство Российской Федерации. Постановление от 28 декабря 2012 года № 1463 «О единых государственных системах координат».
2. Попеко Г. П., Соломатин Е. П. Навигация. Курс кораблеводства. Т. I. Ленинград: Управление Гидрографической службы Военно-Морского Флота, 1961.– 679 с.

3. Ботнев В. А., Устинов С. М. Методы решения прямой и обратной геодезических задач с высокой точностью // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического ун-та. 3(198), 2014. – С. 49–58.

4. Мореходные таблицы (МТ-2000). – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. – 575 с.

5. World Geodetic System 1984. Department of Defense Technical Report TR 8350.2. 1 September 1991. – 152 p.

6. Комаровский Ю. А. Использование различных референц-эллипсоидов в судовой навигации: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2005. – 341 с.

7. Справочник штурмана по математике. Вып. 1. Изд-во Гидрографического управления ВМС МО СССР, 1948. – 355 с.

УДК 629.12.053.83 (075.8)

**Комаровский Юрий Александрович,**

*к.т.н., консультант НИИ МТ МГУ им. Г.И. Невельского*

*[rss.ilyukhina@gmail.com](mailto:rss.ilyukhina@gmail.com)*

## **ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СУДОВОГО GPS-ПРИЁМНИКА ПРОХОДИМЫХ НА МАЛОЙ СКОРОСТИ РАССТОЯНИЙ**

Приёмники спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS эксплуатируются на судах уже более 30 лет. Тем не менее, до сих пор остаётся открытой проблема, связанная с необходимостью исследований возможности применения GPS-приёмников в качестве технического средства учёта проходимого судном расстояния. Проблема усложняется тем, что с помощью приёмника СРНС проходимое расстояние можно измерять одновременно двумя способами. Синхронное применение этих способов может дополнять друг друга, а также предоставлять избыточную информацию для оперативной оценки функциональной надёжности не только отдельно взятой системы учёта пройденного расстояния, но и самого GPS-приёмника. К сожалению, работы в этих направлениях предпринимать преждевременно, так как до сих пор отсутствуют открытые публикации о том, как изменяется точность измерения пройденного расстояния каждого из способов, когда скорость судна становится менее 1 узла (0,5144 м/с). Необходимость исследований в этом диапазоне скоростей диктуется целым рядом практических задач. К числу таких надо отнести задачи мониторинга лишённых хода судов, дрейфа пятен разлитых нефтепродуктов, перемещения ледяных полей и айсбергов вблизи морских платформ. Поэтому написание данной статьи мотивировалось попыткой внести ясность в закономерности функционирования GPS-приёмника на малых скоростях судна.

Судовой GPS-приёмник обладает способностью определять текущие обсервованные координаты судна и элементы вектора его абсолютной скорости. Рассмотрим способ расчёта проходимого судном расстояния, используя обсервованные координаты.

Пусть в моменты времени  $t_{i-1}$  и  $t_i$  GPS-приёмник определяет геодезические координаты первой точки  $(\varphi_{i-1}, \lambda_{i-1})$  и второй точки  $(\varphi_i, \lambda_i)$  соответственно. Будем считать, что моменты времени измерения координат наступают через равные промежутки  $\Delta t_i$ ,  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ . Понятно, что величина  $\Delta t_i$  будет равна периоду обновления обсервованных координат в GPS-приёмнике. Обозначим через  $\Delta\varphi_i$  и  $\Delta\lambda_i$  разность широт и разность долгот в угловых минутах соответственно, где  $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ ,  $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{i-1}$ .

Геодезические координаты (широта  $\varphi$  и долгота  $\lambda$ ) являются угловыми величинами. На референц-эллипсоидах и на морских картах меркаторской проекции линейные масштабы вдоль меридиана и вдоль параллелей не одинаковы и изменяются в зависимости от широты. Поэтому для вычисления величины виртуального расстояния в линейных единицах (метрах, километрах, милях) следует перейти к прямоугольной системе координат, начало которой  $O$  совпадает с локальным условным началом отсчёта геодезических координат, ось  $X$  направлена по параллели в сторону востока, а ось  $Y$  имеет положительное направление на север и совпадает с меридианом. Будем считать, что линейные масштабы вдоль осей  $X$  и  $Y$  будут одинаковы. Примем расстояние между точками с координатами  $(\varphi_{i-1}, \lambda_{i-1})$  и  $(\varphi_i, \lambda_i)$  малым, не превосходящим нескольких метров. Получим формулы для вычисления с высокой точностью расстояния  $\Delta S_i$  в метрах между точками с координатами  $(\varphi_{i-1}, \lambda_{i-1})$  и  $(\varphi_i, \lambda_i)$ . Вычисление элементарного расстояния  $\Delta S_i$  можно осуществить через расчёты линейных смещений вдоль параллели  $\Delta x_i$  и вдоль меридиана  $\Delta y_i$  как линейных эквивалентов разности долгот и разности широт соответственно.

$$\Delta x_i = \Delta\lambda_i \times l_p = (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \times l_p, \quad \Delta y_i = \Delta\varphi_i \times l_m = (\varphi_i - \varphi_{i-1}) \times l_m,$$

где  $l_p$  и  $l_m$  – длины в метрах дуги одной минуты параллели и дуги одной минуты меридиана соответственно,

$$l_m = \frac{a(1-e^2)\text{arc}1'}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi_{cp})^3}}, \quad l_p = \frac{a \cdot \text{arc}1' \cos \varphi_{cp}}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_{cp}}},$$

где  $a$  и  $e$  – большая полуось в метрах и первый эксцентриситет данного референц-эллипсоида,  $\varphi_{cp}$  – средняя широта,  $\varphi_{cp} = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi_i / 2$ .

Отсюда величину элементарного расстояния  $\Delta S_i$  в метрах, на которое переместится антенна судового GPS-приёмника за интервал времени  $\Delta t_i$  с момента  $t_{i-1}$  до момента  $t_i$ , можно вычислить как

$$\Delta S_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}.$$

Общая протяжённость пройденного судном расстояния  $S$  за  $n$  одинаковых интервалов времени определится формулой (1).

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}. \quad (1)$$

Пусть продолжительность интервала времени  $\Delta t_i \rightarrow 0$ , а  $n \rightarrow \infty$ . Тогда величина общего расстояния траектории  $l$  определится следующим криволинейным интегралом первого рода:

$$S = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n dS = \int_l dS = \int_l \sqrt{1 + (y')^2} dx, \quad (2)$$

где  $y'$  – первая производная функции изменения расстояния вдоль меридиана.

Судовой приёмник СРНС Навстар GPS постоянно за каждый интервал времени  $\Delta t_i$  определяет направление (COG – Course Over Ground) и скорость абсолютного перемещения (SOG – Speed Over Ground) своей антенны. В большинстве современных типов судовых GPS-приёмниках длительность  $\Delta t_i$  равна 1 секунде. Пусть в  $i$ -й интервал времени GPS-приёмником измерена абсолютная скорость  $v_i$  в узлах. Скорость судов вычисляется и выводится на экран индикатора GPS-приёмника и на внешние устройства в узлах. Когда же судно совершает плавание по внутренним водным путям, то вывод скорости задаётся в километрах в час.

Обозначим через  $\Delta D_i$  расстояние в метрах, проходимое судном за одну секунду, когда SOG равна  $v_i$  в узлах. Тогда за  $i$ -й интервал времени (за одну секунду) судно пройдёт  $\Delta D_i = 0,5144 v_i$  метров.

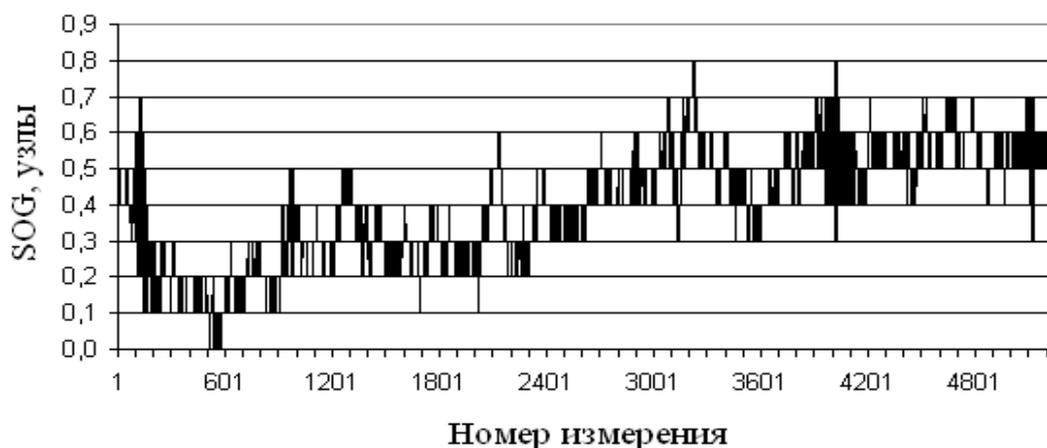
Обозначим через  $D_V$  расстояние в метрах, которое прошло судно за  $n$  секунд, при условии, что абсолютная скорость судна отображалось в узлах,

$$D_V = \sum_{i=1}^n \Delta D_i = 0,5144 \sum_{i=1}^n v_i. \quad (3)$$

Если предположить, что  $\Delta D_i$  и соответствующие им  $\Delta S_i$  определяются с одинаковыми систематическими погрешностями, то при длительном плавании,  $n \rightarrow \infty$ ,  $S$  будет мало отличаться от  $D_V$ , так как оценки математических ожиданий случайных погрешностей будут сходиться к 0. Здесь следует заметить, что точность величины  $D_V$  зависит от точности доплеровских измерений несущей частоты навигационного сигнала, транслируемого спутниками СРНС Навстар GPS. Так как точность доплеровских измерений ухудшается при малых относительных скоростях спутника и антенны GPS-приёмника, то можно предположить, что при скоростях судна, близких к 0 уз, точность определения  $v_i$  и, как следствие  $D_V$ , будут ухудшаться. Поэтому можно ожидать, что при близких к 0 уз абсолютных скоростях судна  $S \neq D_V$  даже при  $n \rightarrow \infty$ .

Чтобы принять или опровергнуть предположение  $S \neq D_V$ , воспользуемся экспериментальным материалом, полученным автором 9 сентября 2005 года на плавучей лаборатории «Галс». Маломерное судно «Галс» принадлежит кафедре Технических средств судовождения Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского. Перед началом эксперимента на «Галсе» был временно установлен судовой GPS-приёмник Furuno GP-37. К выходу GPS-приёмника подключался ноутбук, на жёст-

кий диск которого ежесекундно записывалась информация в виде пакета предложений формата NMEA 0183. Запись данных началась после подъёма якоря в бухте Воеводы острова Русский. «Галс» под действием слабого ветра дрейфовало из бухты Воеводы в Амурский залив. Фиксация обсервованных координат и элементов вектора абсолютной скорости длилась 1,5 часа. За это время было зарегистрировано 5259 значений SOG, которые изменялись в диапазоне от 0 до 0,8 уз. О характере изменения величин абсолютной скорости можно представить по рис. 1.



**Рис. 1.** Изменение абсолютной скорости дрейфующего судна 9.09.2005

На рис. 1 видно, как в начале дрейфа абсолютная скорость, измеряемая приёмником GP-37, уменьшилась до 0, а затем медленно увеличивалась. В последней четверти наблюдений абсолютная скорость дрейфа «Галса» стабилизировалась в диапазоне от 0,5 уз до 0,6 уз. О распределении величин SOG можно судить по табл. 1.

*Таблица 1*

Распределение абсолютной скорости дрейфа «Галса»

SOG, уз	Частота	Частость
0	19	0,003613
0,1	215	0,040882
0,2	752	0,142993
0,3	1118	0,212588
0,4	908	0,172656
0,5	1254	0,238448
0,6	869	0,165241
0,7	118	0,022438
0,8	6	0,001141

Как следует из табл. 1, чаще (в 93% случаях) регистрировались значения SOG в диапазоне от 0,2 уз до 0,6 уз.

На следующем этапе обработки данных были рассчитаны величины  $S$  по формуле (1) при  $l_m = 1851,5833$  м и  $l_p = 1356,4523$  м [1] и  $D_V$  по фор-

муле (3). В результате вычислений были получены следующие значения:  $S = 1132,228$  м,  $D_V = 1083,771$  м. Таким образом, пройденное расстояние, рассчитанное по скоростям, оказывается на 48,457 м меньше расстояния, полученного по приращениям обсервованных координат. Поскольку на точность определения GPS-приёмником обсервованных координат скорость судна не оказывает влияние, то сделано предположение о присутствии в отсчётах абсолютных скоростей некой систематической погрешности, убывающей с увеличением скорости.

Чтобы проверить это предположение, для каждого значения SOG от 0,2 уз до 0,6 уз были сформированы соответствующие этим значениям массивы величин  $\Delta S_i$ . Затем для каждого такого массива были рассчитаны точечные оценки математических ожиданий  $M_j$  и средних квадратических отклонений (СКО)  $\sigma_j$ .

$$M_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta S_{ji}, \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta S_{ji} - M_j)^2}{n}},$$

где  $j$  – значение абсолютной скорости,  $j = 0,2 - 0,6$ ;  $\Delta S_{ji}$  –  $i$ -е значение расстояние в метрах, принадлежащее массиву  $j$ .

Результаты вычислений помещены в табл. 2.

Таблица 2

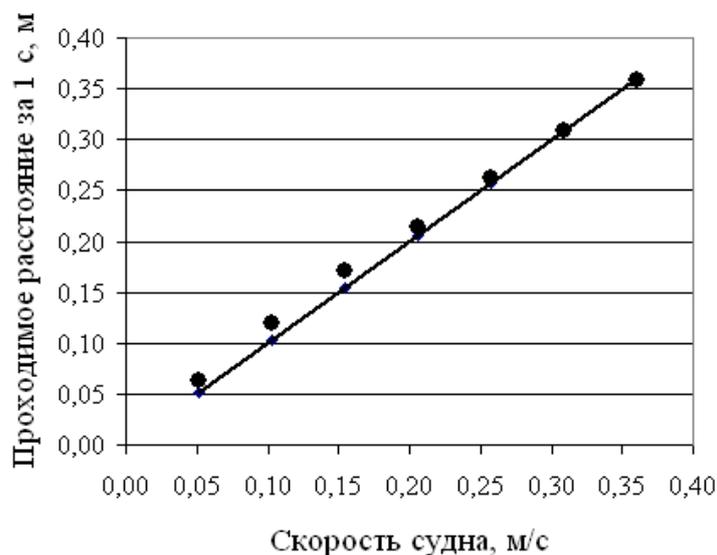
Средние и СКО пройденных расстояний по приращениям координат

SOG, уз	SOG, м/с	Среднее, м	СКО, м
0,2	0,102889	0,1203	0,0896
0,3	0,154333	0,1704	0,0760
0,4	0,205778	0,2140	0,0774
0,5	0,257222	0,2626	0,0874
0,6	0,308667	0,3087	0,0878

Сравнение второго и третьего столбцов табл. 2 подтверждает предположение о присутствии систематической погрешности измерения SOG, которая уменьшается с увеличением скорости судна. Это явление наглядно отображается на рис. 2. Следует также отметить устойчивость величин СКО, что косвенно подтверждает независимость характеристик точности расстояний, полученных по приращениям координат, от скорости судна.

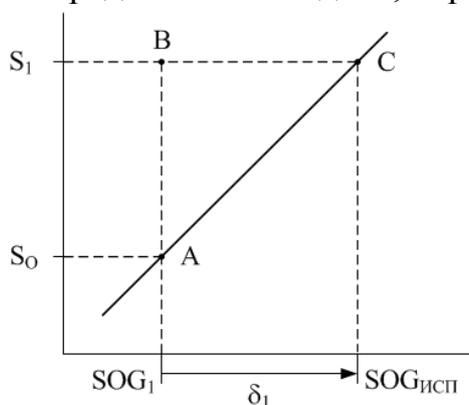
На рис. 2 прямая линия отображает идеальную зависимость пройденного расстояния за 1 секунду от абсолютной скорости судна в м/с. Эта линия предполагает такой характер измерения GPS-приёмником абсолютной скорости, при котором систематическая погрешность измерений полностью отсутствует. Круглые маркеры являются величинами средних пройденных расстояний, соответствующих той или иной величине SOG. Сов-

падение маркера с прямой линией подразумевает отсутствие систематической погрешности. Следовательно, в диапазоне от 0,2 уз до 0,5 уз GPS-приёмник GP-37 измеряет абсолютную скорость с погрешностью, которая убывает с увеличением SOG.



**Рис. 2.** Сравнение пройденных расстояний

Полученные результаты создают предпосылки формирования модели систематической погрешности измерения SOG, а также построения корректора, автоматически исправляющего погрешности измерения. Чтобы описать принцип построения предлагаемой модели, обратимся к рис. 3.



**Рис. 3.** Принцип расчёта поправки к отсчёту SOG

На рис. 3 точка A соответствует измерению абсолютной скорости  $SOG_1$  без систематической погрешности. В этом случае за 1 секунду судно проходило бы  $S_0$  метров. На самом же деле, при отображаемой GPS-приёмником скорости  $SOG_1$  судно за 1 секунду проходит не  $S_0$  метров, а  $S_1$ . Следовательно, реальная скорость судна не  $SOG_1$ , а  $SOG_{исп}$ . Они отличаются на величину  $\delta_1$ , которую будем называть поправкой. Поэтому чтобы точно учитывать проходимое судном расстояние со скоростью  $j$ , необходимо преобразовать выражение (3) к следующему виду:

$$D_j = 0,5144 \sum_{i=1}^n (v_{ji} + \delta_j). \quad (4)$$

Будем рассматривать исправленную абсолютную скорость  $SOG_{исп}$  как сумму отображаемой приёмником скорости  $SOG_1$  и соответствующей ей поправки  $\delta_1$ . В самом общем случае величина  $\delta_1$  будет знакопеременной. Чтобы найти величину поправки, необходимо решить систему уравнений прямых, одна из которых проходит через точки В и С ( $S = S_1$ ), а вторая – через точки А и С ( $S = SOG$ ). Отсюда  $SOG_{испj} = M_j$ , а  $\delta_j = M_j - SOG_j$ .

Рассчитанные величины поправок к отсчётам абсолютных скоростей от 0,2 уз до 0,6 уз помещены в табл. 3.

Таблица 3

Поправки к отсчётам абсолютных скоростей (в м/с)

$\delta_{0,2}$	$\delta_{0,3}$	$\delta_{0,4}$	$\delta_{0,5}$	$\delta_{0,6}$
0,0174	0,0161	0,0082	0,0054	0

На рис. 4 представлено корреляционное поле поправок относительно соответствующих им значений абсолютной скорости. Здесь величины поправок принимаются в качестве случайных величин.

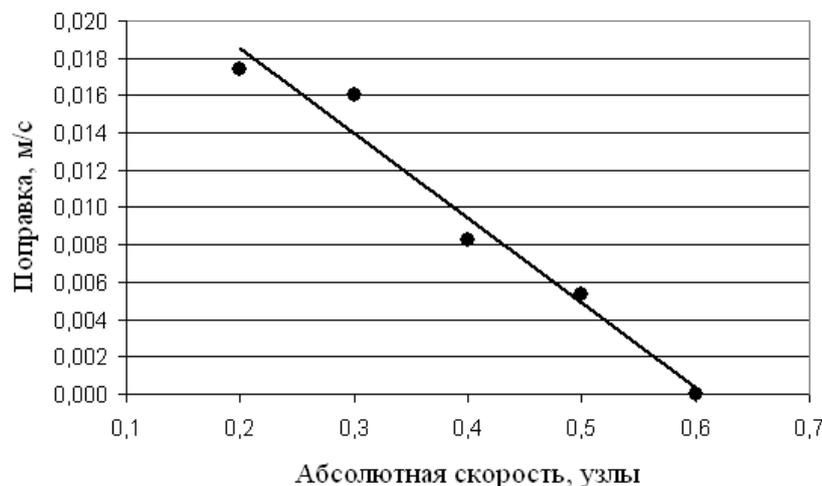


Рис. 4. Зависимость поправок от абсолютной скорости GP-37

В первом приближении зависимость полученных величин поправок от абсолютной скорости можно аппроксимировать линейной моделью вида  $y = -ax + b$ . Далее с помощью метода наименьших квадратов были рассчитаны величины коэффициентов  $a$  и  $b$ . В итоге регрессионное выражение, описывающее зависимость поправок получило следующий вид:

$$\delta_j = -0,0455 \times j + 0,0276.$$

Полученное выражение можно применять только для скоростей судна в диапазоне от 0,2 уз до 0,6 уз. Если абсолютная скорость судна превышает 0,6 уз, то вполне возможны отрицательные значения поправок и иные

формы зависимости поправок. Поэтому необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, которые в итоге приведут к значительному повышению точности судовождения.

#### Список литературы

1. Комаровский Ю. А. Точные вычисления пройденных расстояний на земных эллипсоидах / Современные проблемы развития и методики преподавания естественных и точных наук. Материалы Всероссийской научн.-практ. конф. 16-18 декабря 2009 года. – Уссурийск: Издательство УГПИ, 2009. С. 154-161.

УДК 656.61.052.65.011.56 (0.75.8)

**Комаровский Юрий Александрович,**  
*к.т.н., консультант НИИ МТ МГУ им. Г.И. Невельского*  
*rss.ilyukhina@gmail.com*

### **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ GPS-КОМПАСА JLR-20 ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА АБСОЛЮТНОЙ СКОРОСТИ СУДНА**

Спутниковые компасы стали устанавливаться на судах сравнительно недавно. Частично это служит причиной отсутствия в существующей учебной литературе описания принципов их действия и основ управления ими. Из-за незначительного числа спутниковых компасов на отечественных судах до сих пор нет опубликованных работ, обобщающих опыт эксплуатации этих принципиально новых навигационных приборов. Не сформулированы рекомендации по их эффективному применению и не перечислены ограничения на их использование. Уникальность таких компасов состоит в размещении в одном корпусе обычного спутникового приёмника, генерирующего текущие обсервованные координаты, абсолютного лага, предоставляющего элементы вектора абсолютной скорости судна и пройденного им расстояния, курсоуказателя, отображающего текущий курс судна и скорость его изменения, а также прибора, измеряющего углы крена и дифферента и скорости их изменения. Следовательно, дальнейшее внедрение спутниковых компасов неизбежно поставит под сомнение целесообразность эксплуатации на судах дорогостоящих традиционных гирокомпасов, лагов, гиротажометров и гировертикалей.

Современная отечественная и зарубежная промышленность выпускает на рынок двухантенные и трёхантенные спутниковые компасы. Двухантенные определяют курс и угловую скорость его изменения, координаты, и вектор абсолютной скорости. Трёхантенные компасы в дополнении к перечисленным параметрам определяют ещё углы крена и дифферента, а также скорости их изменения. Поэтому в силу большего числа функций трёхантенных компасов они гораздо перспективнее по сравнению с двухантенными

ми. На отечественных судах, работающих в Азиатско-Тихоокеанском регионе, чаще можно встретить спутниковые компасы, изготавливаемые японской компанией JRC (Japan Radio Corporation). Среди них особое место занимает трёхантенный спутниковый компас JLR-20. Как показали предыдущие исследования, такой компас определяет курс судна с меньшей случайной погрешностью, нежели двухантенные компасы [1-7]. Получена предварительная оценка точности измерения им крена и дифферента [8-10]. Тем не менее, до сих пор отсутствуют сведения о точности определения трёхантенными GPS-компасами обсервованных координат судна и элементов вектора его абсолютной скорости.

В трёхантенных спутниковых компасах для определения текущих обсервованных координат используются псевдодальности до спутников, находящихся в зоне радиовидимости. Псевдодальности определяются с помощью кодовых измерений. Курс судна, а также его углы крена и дифферента определяются на основе измерения разности фаз несущей частоты, принимаемой тремя разнесёнными антеннами компаса. Оценка параметров вектора абсолютной скорости судна происходит в ходе непрерывных измерений доплеровских сдвигов несущей частоты спутников. Следовательно, работа трёхантенного спутникового компаса основывается на одновременном определении трёх различных радионавигационных параметров. Это открывает перспективу разработки многокритериального алгоритма для оперативной оценки функциональной надёжности спутникового компаса. Но здесь необходимы исследования чувствительности работы в компасе программно-аппаратных реализаций получения радионавигационных параметров, а также исследования их взаимной коррелируемости. Поэтому в данной статье целью анализа работы GPS-компаса выбрано получение характеристик, описывающих чувствительность определения направления и модуля абсолютной скорости судна при незначительных его перемещениях.

Было решено оценивать чувствительность измерения компасом JLR-20 элементов вектора абсолютной скорости на основе обработки экспериментальных наблюдений, полученных на ошвартованном судне в тихую погоду. Выбор места проведения наблюдений пал на грузопассажирский паром «Бригадир Ришко», который в течение длительного периода времени был выведен из эксплуатации и стоял ошвартованным левым бортом к пассажирскому пирсу Чуркинской переправы в непосредственной близости от южного устоя моста через бухту Золотой Рог. Ближе к полудню 3 июля 2014 года наблюдалась почти штилевая погода. Сбор экспериментальных данных проводился в течение часа с 12 часов 16 минут Владивостокского времени (01:16 UTC). Стоял туман. Действовал непостоянный прижимной ветер со скоростью не более 1,5 м/с. Покачивание парома не ощущалось. Иногда наблюдались едва заметные крены и дифференты от волн проходящих мимо судов. Тогда антенна компаса JLR-20 совершала линейные перемещения с малыми скоростями. Необходимо было оценить реакцию JLR-20 на такие перемещения.

К сожалению, к выходу компаса подключить ноутбук было невозможно, поэтому текущие показания GPS-компаса JLR-20 пришлось записывать с помощью цифровой видеокамеры. Зафиксированные таким образом показания визуально считывались на моменты обновления каждой секунды времени, заносятся в бумажные протоколы и затем вручную оцифровывались.

В ходе сбора текущих экспериментальных данных компас JLR-20 был настроен на отображение информации в формате, представленном на рис. 1 [11]. На нём в верхнем правом углу высвечивается дата. Ниже можно видеть текущее время по шкале UTC в 24-часовом отображении (часы:минуты:секунды). Аббревиатура HDG (heading) с последующими цифрами означают текущий истинный курс судна с разрядностью 0,1 градуса. Сокращение COG (Course Over Ground) с последующими цифрами является текущим путевым углом перемещения судна. SOG 12.8 kt – это текущее значение абсолютной скорости судна в узлах (1 уз = 0,514444 м/с). Таким образом, COG и SOG – это интересующие нас параметры вектора абсолютной скорости перемещения антенны спутникового компаса JLR-20.

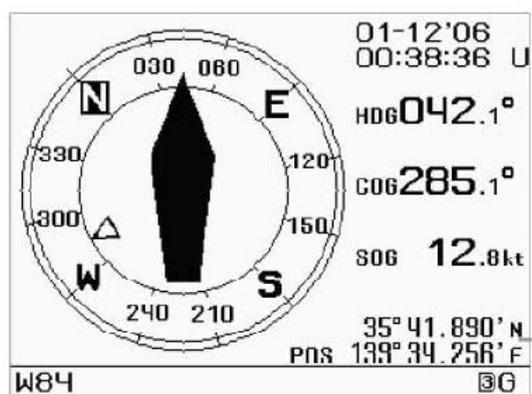
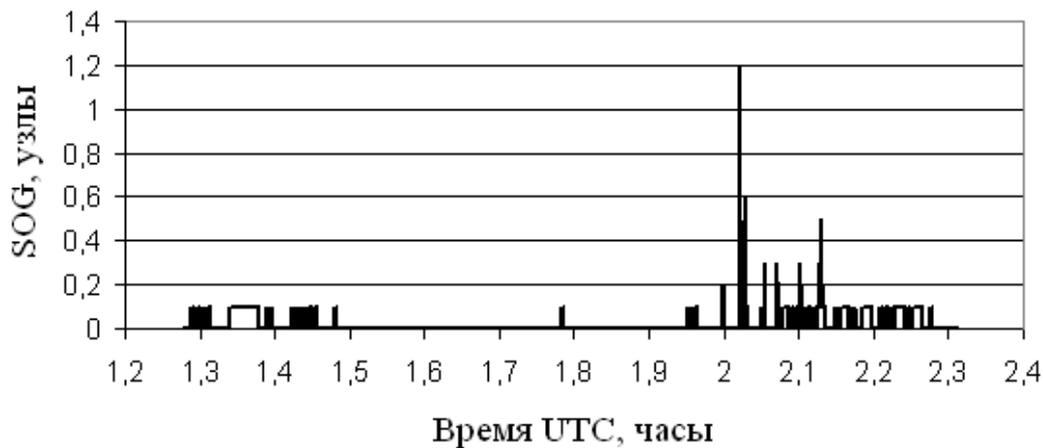


Рис. 1. Выводимая на экран индикатора JLR-20 текущая информация [11]

В двух нижних строках можно видеть текущие обсервованные координаты судна.

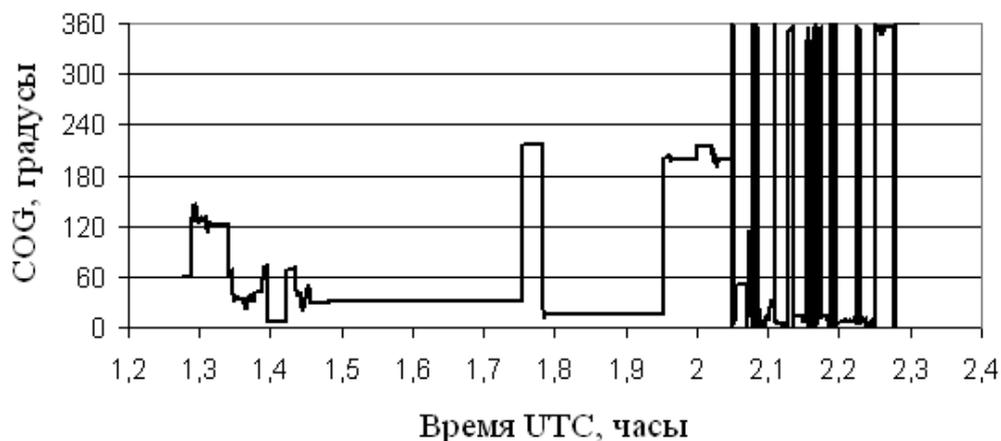
Всего в ходе наблюдений с 1,27 часов по 2,31 часа UTC было зарегистрировано 3736 значений COG и SOG. График изменения модуля вектора абсолютных перемещений (SOG) представлен на рис. 2.

Превосходящие 0 значения SOG регистрировались в начале и в конце наблюдений. Среди превосходящих 0 величин SOG чаще всего фиксировались значения 0,1 уз. Они встречались в 18,6% от всех наблюдений. На долю SOG, значения которых были больше 0,1 уз, пришлось всего 1,2%. Схожее распределение SOG имели место и у неподвижных судовых GPS-приёмников других типов. Поэтому можно сделать вывод о близости их характеристик чувствительности, с которой происходит измерение малых величин модулей абсолютных скоростей.



**Рис. 2.** Характер изменения модуля абсолютной скорости ошвартованного парома

На рис. 3 можно видеть график, который даёт представление о характере изменения направления вектора абсолютной скорости перемещения антенны JLR-20.



**Рис. 3.** Характер изменения путевого угла ошвартованного парома

Сравнение рис. 3 и рис. 2 позволяет сделать вывод о существовании корреляционной связи между процессами измерения модуля и направления абсолютной скорости антенны GPS-компаса JLR-20. Интенсивные изменения COG на рис. 3 совпадают с флуктуациями SOG на рис. 2. Тем не менее, у JLR-20 наблюдается одна особенность в характере поведения COG при нулевых значениях скорости. Ранее автором было зафиксировано у судового GPS-приёмника GP-37 компании Furuno увеличение дисперсии COG при уменьшении абсолютной скорости судна. У JLR-20 наблюдаются неизменные значения COG при нулевых значениях абсолютной скорости.

Этот факт интерпретируется как потеря чувствительности при малых величинах SOG. Обнаруженное свойство снижает эффективность GPS-компаса JLR-20 при решении с его участием задач учёта расстояний, проходимых судном в дрейфе. Очевидно, алгоритм вычисления направления и модуля вектора абсолютной скорости, реализованный в JLR-20, нуждается

в доработке. Следует повысить разрядность определения скорости до 0,01 уз и увеличить чувствительность вычисления COG.

Необходимо продолжить экспериментальные исследования работы GPS-компаса JLR-20, направленные на определение порога чувствительности определения им направления вектора абсолютной скорости судна.

#### Список литературы

1. Комаровский Ю. А. Определение поправки спутникового компаса на малотоннажном судне // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Материалы XXI международной научн.-практ.-тич. конф. 2-4 окт. 2015 г. (FEBRAT-15). – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2015. – С. 163-166.
2. Комаровский Ю. А. Случайные погрешности трёхантенного GPS-компаса JLR-20 на ошвартованном малотоннажном судне // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, № 4, Новосибирск, 2014. – С. 112-115.
3. Комаровский Ю. А. Анализ высокочастотной компоненты девиации спутникового компаса JLR-10T // Вестник Морского государственного университета. Вып. 43/2010. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2010. – С. 90-93.
4. Комаровский Ю. А. Сравнительная оценка случайных погрешностей GPS-компасов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета” Вып. IV-(4)/2010. Сер. Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – С. 26-33.
5. Комаровский Ю. А. Предварительная оценка точности определения курса спутниковым компасом JLR-10T // Вестник Морского государственного университета. Вып. 42/2010. Серия : Судовождение. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2010. – С. 29-36.
6. Комаровский Ю. А. Повторяемость погрешностей курса спутникового компаса JLR-10T // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, № 2, Новосибирск, 2009. – С. 144-148.
7. Комаровский Ю. А. Влияние расположения спутников на точность работы GPS-компаса JLR-10T // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Материалы XXI международной научн.-практ.-тич. конф. 2-4 окт. 2015 г. (FEBRAT-09). 30 сентября – 2 октября 2009 г. – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2009. – С. 103-105.
8. Комаровский Ю. А. Погрешности измерения GPS-приёмником JLR-20 углов крена и дифферента ошвартованного паромы // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, № 4, Новосибирск, 2015. – С. 89-92.
9. Комаровский Ю. А. Использование GPS-аппаратуры для оценки остойчивости судна по углу крена на установившейся циркуляции // Электронный журнал Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета», 2015, № 2 (23). – С. 39-50. URL: <http://www.vestnikis.dvfu.ru/images//2015-2-6.pdf>
10. Комаровский Ю. А. Использование трёхантенных GPS-компасов для оперативной оценки остойчивости судна // Морские интеллектуальные технологии. Специальный выпуск № 1, 2013. – С. 67-69.
11. JLR-20/30 GPS компас. Руководство пользователя. Japan Radio Co., Ltd. – 85 с.

*Левченко Наталья Георгиевна,  
к.т.н., доцент кафедры АИС, МГУ им. Г.И. Невельского*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ**

Создание и внедрение отечественных интеллектуальных транспортных систем ускорит развитие национальной транспортной, территориальной и информационной инфраструктур, а также обеспечит благоприятный климат для внедрения сервисов на основе глобальных навигационных спутниковых систем, в том числе позволит повысить эффективность управления перевозками и сократить непроизводительные затраты на транспортировку грузов.

В октябре 2015 года состоялся седьмой российский Международный конгресс по интеллектуальным транспортным системам (далее – ИТС). Первый конгресс прошёл при поддержке Министерства транспорта РФ в 2009 году и стал ежегодным. Программы конгрессов поднимают ключевые проблемы внедрения интеллектуальных систем, в том числе использование элементов ИТС на водном транспорте; ИТС на службе транспортно-логистических компаний; научное и кадровое обеспечение ИТС, без которых невозможна успешная модернизация транспортного комплекса. На них обсуждаются вопросы по созданию единой информационной среды транспортного комплекса и аналитических информационных систем поддержки процессов управления его развитием в рамках Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года. Единая информационная среда подразделяется на уровни: управленческий (информационная среда Минтранса РФ и находящихся в его ведении федеральных служб и агентств); технологический (информационная среда различных видов транспорта и участников транспортного процесса, в том числе среда интеллектуальных транспортных систем); пользовательский (информационная среда транспортных услуг и информационного обслуживания клиентов). В принятой участниками конгресса резолюции было сформулировано понятие интеллектуальных транспортных систем – это интеграция информационно-коммуникационных технологий между ключевыми составляющими транспортных процессов: человек – транспортные средства – транспортная инфраструктура [1].

Особое внимание правительством нашей страны уделяется развитию Северного Морского пути. И чтобы он заработал как эффективный транзитный маршрут, а также в целях стимулирования деловой активности на российском Тихоокеанском побережье и освоении арктических территорий, необходимо применение ИТС. В апреле 2016 года состоялась вторая Международная конференция «Транспорт и логистика в Арктике» при поддержке Государственной Думы РФ (комитет по транспорту), Мини-

стерства транспорта РФ, Федерального агентства морского и речного транспорта, Министерства экономического развития РФ, на которой среди ключевых вопросов обсуждения была государственная стратегия построения и развития транспортно-логистической инфраструктуры Арктики. На конференции были представлены транспортные технологии и логистические решения в Арктическом регионе и транспортно-транзитный потенциал арктических маршрутов [2].

На многих транспортных предприятиях уже создана мощная информационная среда, в которую входят системы сбора данных, сети передачи, вычислительная инфраструктура, программное обеспечение, базы данных, информационные хранилища и др. Однако эта среда не используется в полной мере, так как на руководящих работников обрушивается огромный объем слабоструктурированной информации, который человеческий разум не способен своевременно проанализировать, а значит, возникают трудности в принятии эффективных технологических и управленческих решений. Для экономической рыночной среды характерна быстрая изменчивость. Поэтому менеджмент предприятия должен оперативно реагировать на эти изменения, соответствующим образом адаптироваться. Очевидно, что большие массивы данных, которые необходимо оперативно анализировать в режиме реального времени для принятия экономических решений, уже невозможно собирать и обрабатывать без применения современных информационных технологий. К тому же неполнота и нечеткость исходной информации (сведения, которые размыты, смутны, неопределенны, неясны или неточны по своей природе), увеличение количества факторов из различных предметных областей приводит к тому, что наиболее подходящими и эффективными методами являются методы управления с применением интеллектуальных информационных технологий. Основное преимущество этого подхода заключается в способности методов подстраиваться под новые наблюдения (факторы) и выявлять сложные (нелинейные) взаимосвязи между значениями входных и выходных данных, позволяют более эффективно соединять формализуемые и плохо формализуемые знания.

Следовательно, руководящим работникам или лицам, принимающим решения, необходим мощный интеллектуальный инструмент, который перерабатывал бы данные из информационных систем и выдавал адресный анализ – варианты возможных управленческих решений и полномочий для разных должностных лиц. Такой инструмент позволил бы максимально ускорить процессы интеллектуального анализа информации, подготовки основы для принятия решений и прогнозирования результатов различных возможных вариантов управляющих воздействий на систему.

Интеллектуальные информационные технологии совместно с достижениями современной теории управления являются основой интеллектуальных систем управления.

Интеллектуальные системы управления это системы управления способные к «пониманию» и обучению в отношении объектов управления, возмущений, внешней среды и условий работы. Основное отличие интел-

лектуальных систем – наличие механизма системной обработки баз знаний. Главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальные системы управления от «традиционных» это механизм получения, хранения и обработки знаний для реализации своих функций [3].

При разработке интеллектуальных систем управления учитывают два основополагающих принципа: ситуационное управление, т.е. управление на основе анализа внутренних и внешних ситуаций или событий, и использование современных информационных технологий обработки знаний.

Интеллектуальное управление должно обладать следующими свойствами: способностью к обучению и адаптации; устойчивостью к повреждениям и неполадкам; гибкостью к включению новых компонентов; дружественным к пользователю интерфейсом. Большую роль играет также выбор определённых технических средств, системного и прикладного программного обеспечения.

Интеллектуальные технологии между собой различает, прежде всего, то, что именно положено в основу концепции интеллектуальности: умение работать с формализованными знаниями человека - экспертные системы; оперировать с плохо формализованными данными – нечеткая логика; применять свойственные человеку приемы обучения и мышления – искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы.

Экспертные системы (далее – ЭС) были разработаны как научно-исследовательские инструментальные средства в 1960-х годах и рассматривались в качестве искусственного интеллекта специального типа, предназначенного для успешного решения сложных задач в узкой предметной области [4].

ЭС показали свою способность также успешно решать практические задачи, которые являются слабоструктурированными и с трудом поддаются решению с помощью других средств. Это реальные задачи, когда приходится пользоваться неопределенной или неполной информацией, когда данные могут оказаться неправильными, неполными, несогласованными, а также содержать ошибки разных типов, поскольку большая часть человеческих знаний является эвристической. Это означает, что знания могут оказаться правильными не во всех ситуациях. Такие задачи невозможно решить с помощью классических методов программирования, поскольку для них отсутствует известный или достаточно эффективный алгоритм, поэтому необходимо применить другой альтернативный по отношению к алгоритмическому программированию подход.

Технология экспертных систем может включать специальные языки экспертных систем, а также программные и аппаратные средства, предназначенные для обеспечения разработки и эксплуатации экспертных систем. Фактически ЭС стали рассматриваться как метод программирования.

Экспертные системы работают в основном в сочетании с автоматизированными системами принятия решений и базами знаний для обеспечения распознавания образов по такому же принципу, как это делает человек,

а также для обеспечения выявления знаний с помощью анализа скрытых закономерностей в данных и создания таким образом интеллектуальной базы знаний.

В настоящее время экспертные системы широко используются в бизнесе, науке, технике, на производстве, а также во многих других сферах, где существует вполне определенная предметная область. В транспортной отрасли ЭС используется в управлении транспортом, запасами, складировании и т.п. Экспертные системы применяются на различных стадиях логистического процесса, они помогают облегчить процесс решения проблем, для которых необходимы экспертный опыт, значительные временные затраты на обработку и анализ информации, таким образом, помогают упростить и ускорить процесс принятия управленческого решения.

Искусственные нейронные системы (ИНС) вошли как новое направление среди широко применяемых принципов программирования в 1980-х годах. Это направление основано на открытии одного из способов обработки информации мозгом человека, то есть за основу взят подход к решению задач с точки зрения организации вычислений в том стиле, который применяется в мозгу, а не с помощью манипулирования символами на основе правил [4].

Нейронная сеть – это совокупность нейронных элементов и связей между ними, которые получают входные данные, осуществляют их обработку и генерируют на выходе результат. Между узлами видимых входного и выходного слоев может находиться определенное число скрытых слоев. Слоем нейронной сети называется множество нейронных элементов, на которые в каждый такт времени параллельно поступает информация от других нейронных элементов сети.

Математическая модель нейронного элемента сети, так называемый формальный нейрон, представляет собой некоторый универсальный нелинейный элемент с возможностью широкого изменения и настраивания его характеристик посредством операции нелинейного преобразования суммы произведений входных сигналов на весовые коэффициенты.

Нейронные сети могут обучаться и самонастраиваться. Обученная сеть может быть устойчивой к некоторым отклонениям входных данных, что позволяет ей правильно распознавать образ, содержащий различные помехи и искажения [5].

В процессе обучения нейронной сети достигается их самоорганизация и самоадаптация за счет определения связей между нейронами, когда в ответ на входное воздействие согласно обучающим правилам изменяются весовые коэффициенты.

Существует большое число алгоритмов обучения, ориентированных на решение разных задач. Характерная особенность ИНС в том и заключается, что процесс программирования традиционного пути решения задач здесь заменяется процедурой обучения сетей. Метод обучения ИНС является одним из главных классификационных признаков сетей.

Основные функции, выполняемые сетью можно разделить на несколько групп: распознавание и классификация текущего состояния системы; сжатие данных; прогнозирование; идентификация; управление; ассоциации. [6] Сеть обучается важнейшим признакам образов для их распознавания и классификации, которые и составляют базу для принятия решений. Она прогнозирует будущую реакцию системы по ее предшествующему поведению. Натренированная на ограниченном множестве обучающих выборок, нейронная сеть обобщает накопленную информацию и вырабатывает ожидаемую реакцию применительно к новым данным. При решении задач управления сложными динамическими процессами нейронная сеть обеспечивает выработку соответствующего управляющего воздействия. Выступает в роли следящей системы, адаптирующейся к изменяющимся условиям внешней среды. Может играть роль ассоциативного запоминающего устройства и помочь избежать значительного количества случайных ошибок, например, при вводе входной информации невнимательным пользователем. Транспортно-логистический процесс характеризуется большим количеством параметров со сложными взаимосвязями. Свойство нейронной сети параллельно обрабатывать информацию одновременно всеми нейронами при большом количестве межнейронных связей позволяет значительно ускорить процесс обработки информации.

В настоящее время ИНС применяются во многих приложениях: распознавание образов, например, речи, лиц; в медицинской диагностике, например, интерпретации кардиограмм; в сфере обработки коммерческой информации, например, подготовки аналитических прогнозов; и много других областей применения от перевода с одного языка на другой, ведения игр, и даже управление двигателем автомобиля. Сети различных архитектур предназначены для решения различных задач, из которых наиболее важен класс плохо формализуемых задач, где нет явных зависимостей между входными и выходными величинами. Таким образом, искусственные нейронные сети эффективны там, где нужен аналог человеческой интуиции, именно в решении таких задач, где обычно трудно составить явный алгоритм. В прикладных задачах, таких как управление транспортно-логистическим процессом, нейронную сеть используют как самостоятельную систему представления знаний в качестве одного из компонентов системы управления, либо модуля принятия решений, передающего результирующий сигнал в другие подсистемы, не связанные с нейронной сетью непосредственно.

Нечеткая логика и продукционные правила, основанные на ее концепции, представляют собой средство моделирования неопределенностей естественных понятий языка. То есть, методы нечеткой логики позволяют строить логико-лингвистические модели, используя качественные представления, по сути соответствующие способам рассуждений и принятия решений человеком. Применение нечеткой системы управления показано при наличии неопределенности, нечеткости информации о системе, а также сложности системы, невозможностью или нецелесообразностью из-за

трудоемкости и дороговизны ее описания традиционными формализуемыми математическими методами или даже невозможностью полноты описания. Значительная часть информации о системе доступна в виде экспертных данных или в эвристическом описании процессов функционирования в форме нечетких правил или зависимостей различного типа. В нечеткой системе управления для описания объектов и явлений вводятся понятия нечеткого множества, нечеткой и лингвистической переменной [3].

Понятие нечеткого множества это формализация лингвистической информации для построения математических моделей. В основе этого понятия лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать им в различной степени и, следовательно, принадлежать к этому множеству с различной степенью (Л. Заде).

На вход системы с нечеткой логикой поступают как нечеткие, так четкие переменные, которые при помощи процедуры фазификации преобразуются в нечеткие множества. С помощью экспертов создается база правил вида «если ..., то ...», включаемая в систему. Над входными переменными с помощью базы правил производятся необходимые преобразования, после чего посредством методов дефазификации (перехода от нечетких переменных к четким) на выходе системы формируется четкая выходная переменная.

На транспортно-логистический процесс оказывает влияние множество факторов, определяемых особенностями внешней среды, ее социально-экономическими, рыночными и даже политическими характеристиками. Таким образом, большую часть факторов можно отнести к категории субъективной, нечеткой, неопределенной, они не могут быть полностью обработаны инструментами классической математики. В данном случае необходимо воспользоваться другими средствами – средствами обработки нечеткой информации. Чтобы оперировать данными, имеющими свойства размытости и неточности, формализовать полученные знания, необходимо применить формальный аппарат нечеткой алгебры и нечеткой логики.

Генетические алгоритмы (далее – ГА) представляют собой алгоритмы поиска оптимальных решений, построенные на принципах естественного отбора и генетики. Любое возможное решение отображается в виде строки (хромосомы) фиксированной длины, к популяции которых применяются традиционные генетические операторы: селекция, скрещивание, мутация. Селекция направляет генетический поиск в перспективные районы пространства решений. Скрещивание выполняет случайный поиск вблизи локального оптимума. Мутация отыскивает улучшенное решение.

Важной особенностью эволюционного моделирования является возможность получения рациональных решений как на непрерывных, так и на дискретных множествах параметров. Большинство исследователей признают генетический алгоритм одним из самых эффективных методов решения задач многоэкстремальной оптимизации и тому способствуют несколько причин [3]: метод инвариантен к размерности задачи; для многих

типов задач этот метод показал более эффективный результат по сравнению с другими методами; метод позволяет решать задачи, структуру решения которых исследователь не знает, так как естественный отбор устраняет необходимость заранее учитывать все особенности решения задачи; высокая скорость решения из-за высокого параллелизма алгоритма данного типа, так как каждый объект популяции может обрабатываться независимо; эволюционные методы целесообразно применять, если задачи трудно формализуемы или требуется получить грубый результат для принятия решения в реальном времени.

К задачам в сфере менеджмента, решаемым посредством ГА, можно отнести составление плана оптимальных перевозок, определение лучшей торговой стратегии, размещение производственных мощностей и т.п.

Еще одним видом интеллектуальных технологий является нелинейная динамика или теория хаоса. Она согласуется в большей степени с ежедневным опытом человека, чем точная предсказуемость. Оказалось, что обычные детерминированные уравнения, описывающие некоторую экономическую модель, при определенных условиях приводят к хаотическим явлениям. Многие финансовые временные ряды являются хаотическими, для анализа и оценки которых нужно использовать специальные методы, которые во множестве и разнообразии в зависимости от поставленной задачи предлагает нелинейная динамика.

Дальнейшие перспективы развития искусственного интеллекта, скорее всего, будут связаны с использованием новых революционных достижений в разработке квантовых компьютеров, применением колоссальной вычислительной мощности связанных на основе Grid-технологии в единую сеть миллионов компьютеров в Интернет, а также биотехнологии WETLAB, в которой используются нити РНК.

Успешным практическим применением интеллектуальных методов в управлении является пример использования самообучающейся автоматизированной системы Smart Truck (НПК «Разумные решения») [7].

Перед менеджерами транспортной компании «Монополия» встала задача найти автоматизированную систему для эффективного управления большим парком автомобилей (более тысячи) в режиме реального времени. Они рассмотрели 15-20 пакетов для планирования (SAP, i2, JTA, ILOG и др.) в Европе и США, но подходящих сервисов не нашлось, т.к. в них обычно заложено, что все заказы и ресурсы известны заранее. Таким образом, все сводится к обычным учетным системам, которые предлагают управлять бизнесом на основе «вчерашних» данных.

В самарской НПК «Разумные решения» им предложили автоматизированную систему Smart Truck. Это мультиагентная система, в которой параметры могут меняться в реальном времени, поэтому гибкое решение выстраивается на основе переговоров и самоорганизации агентов заказов, грузовиков, маршрутов, грузов и т.д. Мультиагентные системы состоят из тысяч самостоятельных, независимых друг от друга интеллектуальных агентов, способных воспринимать ситуацию, принимать решения и взаи-

модействовать между собой. Такие системы устроены по «роевому» принципу: заказы, грузовики, грузы, водители и другие участники имеют программных агентов со своими целевыми функциями. Они работают на улучшение показателей, выявляют и разрешают конфликты путем переговоров с уступками. Найденный баланс адаптивно перестраивается по событиям в реальном времени.

Устроена смарт-система «Монополии» так: на грузовик ставятся датчики, которые одновременно фиксируют более 40 параметров – массу, скорость движения, местоположение, уровень топлива в баке, обороты двигателя, время работы складов, погоду и даже состояние трассы. Данные через мобильный интернет передаются на сервер, где компьютер анализирует все условия и выбирает оптимальный способ выполнения заказа на перевозку с учетом маршрута, оценки тарифа, времени отгрузки, сна и отдыха водителя, ситуации на дороге, погоды и т.д. Это самообучаемая автоматизированная система, где система контролирует все процессы, а люди работают лишь с отклонениями. Система может перестраивать планы в реальном времени, например, если пришел важный заказ, задержалась оплата или водитель заболел. Таким образом, достигается повышение эффективности на 20-40%.

Сферы, где наиболее востребованы мультиагентные системы, онлайн-торговля, авиа- и железнодорожные перевозки, логистика, космические системы.

В наши дни становится все более очевидным, что ни один из отдельно взятых методов искусственного интеллекта не позволяет успешно справиться со всеми проблемами управления. Лучше всего проявляет себя комбинация методов. Это означает, что очень важно иметь представление об интеллектуальных методах, знать преимущества и недостатки каждой технологии, чтобы использовать ее должным образом.

#### Литература

1. 7-й Российский международный конгресс по интеллектуальным транспортным системам - <http://www.itamain.com/its7kq.php> [Дата обращения: 01.05.2016 г.]
2. 2-я Международная конференция «Транспорт и логистика в Арктике» - <http://www.itamain.com/arc2016program.php> [Дата обращения: 01.05.2016 г.]
3. Усков, А.А., Круглов, В.В. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003.– 177 с.
4. Джарратано, Джозеф, Райли, Гари. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. — М. : ООО «Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1152 с. : ил. – Парал. тит. англ.
5. Головкин, В.А. – Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4./Общая ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.: ил. (Нейрокомпьютеры и их применение)
6. Круглов, В.В., Борисов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика – М.: Горячая линия–Телеком, 2001. – 382 с.
7. «Умные» грузовики: как организовать перевозки по принципу птичьих стай - <http://www.rbc.ru/magazine/2016/04/56ead0549a79474e4031fc94> [Дата обращения: 11.05.2016 г.]

*Осокина Елена Борисовна,  
доцент кафедры ЭОС, МГУ им. Г.И. Невельского*

## СИНТЕЗ РОБАСТНОГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

Устойчивость системы управления движением судна является безусловным требованием, обеспечивающим её работоспособность [1]. Кроме требований устойчивости системы предъявляются также определённые требования и к качеству процессов управления. В настоящей статье оценка процессов управления основана на показателе степени устойчивости [2,3], который определяется корнем (с отрицательной вещественной частью) характеристического уравнения, ближайшим к мнимой оси комплексной плоскости корней.

Динамика свободных движений системы управления с использованием ПИ-регулятора:

$$W_p(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

в соответствии с характеристическим уравнением:

$$\tau_1 \tau_2 s^4 + (\tau_1 + \tau_2) s^3 + (k_p k_c \tau_0 + 1) s^2 + k_c (k_i \tau_0 + k_p) s + k_i k_c = 0,$$

описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_x \ddot{x} + T_\Sigma \ddot{x} + T_k \dot{x} + K_1 \dot{x} + K_2 x = 0,$$

где  $x$  – выходная переменная (курс судна), а  $T_x = \tau_1 \tau_2$ ,  $T_\Sigma = \tau_1 + \tau_2$ ,  $T_k = k_p k_c \tau_0 + 1$  и  $K_1 = k_c (k_i \tau_0 + k_p)$ ,  $K_2 = k_i k_c$  – интервальные параметры ( $k_p$ ,  $k_i$  – коэффициенты передачи ПИ-регулятора).

Используя дополнительную переменную:

$$x(t) = y(t) e^{-\alpha t},$$

где  $\alpha$  – степень устойчивости, получаем дифференциальное уравнение для  $y(t)$ :

$$\begin{aligned} T_x \ddot{y} + [T_\Sigma - 4T_x \alpha] \ddot{y} + [6T_x \alpha^2 - 3T_\Sigma \alpha + T_k] \dot{y} + \\ + [3T_\Sigma \alpha^2 - 4T_x \alpha^3 - 2T_k \alpha + K_1] \dot{y} + \\ + [T_x \alpha^4 - T_\Sigma \alpha^3 + T_k \alpha^2 - K_1 \alpha + K_2] y = 0 \end{aligned}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= T_{\times}; \\
 a_1 &= T_{\Sigma} - 4T_{\times}\alpha; \\
 a_2 &= 6T_{\times}\alpha^2 - 3T_{\Sigma}\alpha + T_k, \\
 a_3 &= 3T_{\Sigma}\alpha^2 - 4T_{\times}\alpha^3 - 2T_k\alpha + K_1 \\
 a_4 &= T_{\times}\alpha^4 - T_{\Sigma}\alpha^3 + T_k\alpha^2 - K_1\alpha + K_2
 \end{aligned}$$

Согласно теореме Харитонова [2,3], для уравнения четвёртого порядка необходимо рассмотреть первые два полинома Харитонова:

$$\begin{aligned}
 P_1(s) &= \overline{a_0} * s^4 + \overline{a_1} * s^3 + \overline{a_2} * s^2 + \overline{a_3} * s + \overline{a_4} \\
 P_2(s) &= \overline{a_0} * s^4 + \overline{a_1} * s^3 + \overline{a_2} * s^2 + \overline{a_3} * s + \overline{a_4}.
 \end{aligned}$$

Из интервальных коэффициентов уравнения строятся матрицы для  $P_1(s)$  и  $P_2(s)$  и вычисляются определители Гурвица.

Таким образом, для  $P_1(s)$ :

$$G = \begin{pmatrix} \overline{a_1} & \overline{a_3} & 0 & 0 \\ \overline{a_0} & \overline{a_2} & \overline{a_4} & 0 \\ 0 & \overline{a_1} & \overline{a_3} & 0 \\ 0 & \overline{a_0} & \overline{a_2} & \overline{a_4} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{a_0} &= T_{\times max}; \\
 \underline{a_1} &= T_{\Sigma min} - 4T_{\times max}\alpha; \\
 \underline{a_2} &= 6T_{\times min}\alpha^2 - 3T_{\Sigma max}\alpha + T_{k min}, \\
 \overline{a_3} &= 3T_{\Sigma max}\alpha^2 - 4T_{\times min}\alpha^3 - 2T_{k min}\alpha + K_{1 max} \\
 \overline{a_4} &= T_{\times max}\alpha^4 - T_{\Sigma min}\alpha^3 + T_{k max}\alpha^2 - K_{1 min}\alpha + K_{2 max}
 \end{aligned}$$

Вычислим определители Гурвица, используя данные из таблицы.

Таблица 1

Значения параметров передаточных функций судов типа «Инженер А. Пустошкин»

параметр	коэффициент поворотливости $K_c, c^{-1}$	параметр $\tau_0$	параметр $\tau_1$	параметр $\tau_2$
скорость хода				
при скорости хода 10,7 узлов порожнем	0,017	5	12	3
при скорости хода 9,5 узлов с грузом	0,014	8	22	12

Таким образом, используемые коэффициенты могут принимать значения:

$$\begin{aligned} T_x &\in [36; 264], T_{\Sigma} \in [15,049; 34,095], \\ T_k &\in [1,063; 1,1224], K_1 \in [0,013; 0,016], \\ K_2 &\in [0,00004; 0,00005], \end{aligned}$$

и для принятых параметров получаем:

$$\Delta_1 = T_{\Sigma \min} - 4T_{x \max} \alpha$$

Следовательно, в этом случае максимальная гарантированная степень устойчивости определяется из условия:

$$\alpha \leq \frac{T_{\Sigma \min}}{4T_{x \max}} = 0,01 (\text{с}^{-1})$$

Задавая  $\alpha = 0.004$ , проверим положительность остальных определителей Гурвица:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= (T_{\Sigma \min} - 4T_{x \max} \alpha) * (6T_{x \min} \alpha^2 - 3T_{\Sigma \max} \alpha + T_{k \min}) - \\ &T_{x \max} * (3T_{\Sigma \max} \alpha^2 - 4T_{x \min} \alpha^3 - 2T_{k \min} \alpha + K_{1 \max}) = 4,7 > 0 \\ \Delta_3 &= ((T_{\Sigma \min} - 4T_{x \max} \alpha) * (6T_{x \min} \alpha^2 - 3T_{\Sigma \max} \alpha + T_{k \min}) \\ &* (3T_{\Sigma \max} \alpha^2 - 4T_{x \min} \alpha^3 - 2T_{k \min} \alpha + K_{1 \max})) \\ &- ((T_{\Sigma \min} - 4T_{x \max} \alpha)^2 \\ &* (T_{x \max} \alpha^4 - T_{\Sigma \min} \alpha^3 + T_{k \max} \alpha^2 - K_{1 \min} \alpha + K_{2 \max}) + T_{x \max} \\ &* (3T_{\Sigma \max} \alpha^2 - 4T_{x \min} \alpha^3 - 2T_{k \min} \alpha + K_{1 \max})^2) = 0,041 > 0 \\ \Delta_4 &= \Delta_3 * (T_{x \max} \alpha^4 - T_{\Sigma \min} \alpha^3 + T_{k \max} \alpha^2 - K_{1 \min} \alpha + K_{2 \max}) = \\ &= 0,00000006 > 0 \end{aligned}$$

Для  $P_2(s)$ :

$$G = \begin{pmatrix} \overline{a_1} & \overline{a_3} & 0 & 0 \\ \overline{a_0} & \overline{a_2} & \overline{a_4} & 0 \\ 0 & \overline{a_1} & \overline{a_3} & 0 \\ 0 & \overline{a_0} & \overline{a_2} & \overline{a_4} \end{pmatrix}$$

$$\overline{a_0} = T_{x \max};$$

$$\overline{a_1} = T_{\Sigma \max} - 4T_{x \min} \alpha;$$

$$\overline{a_2} = 6T_{x \min} \alpha^2 - 3T_{\Sigma \max} \alpha + T_{k \min},$$

$$\overline{a_3} = 3T_{\Sigma \min} \alpha^2 - 4T_{x \max} \alpha^3 - 2T_{k \max} \alpha + K_{1 \min}$$

$$\overline{a_4} = T_{x \max} \alpha^4 - T_{\Sigma \min} \alpha^3 + T_{k \max} \alpha^2 - K_{1 \min} \alpha + K_{2 \max}$$

Согласно критерию Гурвица для устойчивости необходимо и достаточно, чтобы все  $n$ -диагональных миноров (определителей Гурвица) были положительны.

$$\Delta_1 = T_{\Sigma \max} - 4T_{x \min} \alpha > 0$$

Следовательно, в этом случае максимальная гарантированная степень устойчивости определяется из условия:

$$\alpha \leq \frac{T_{\Sigma \max}}{4T_{x \min}} = 0,2(\text{с}^{-1})$$

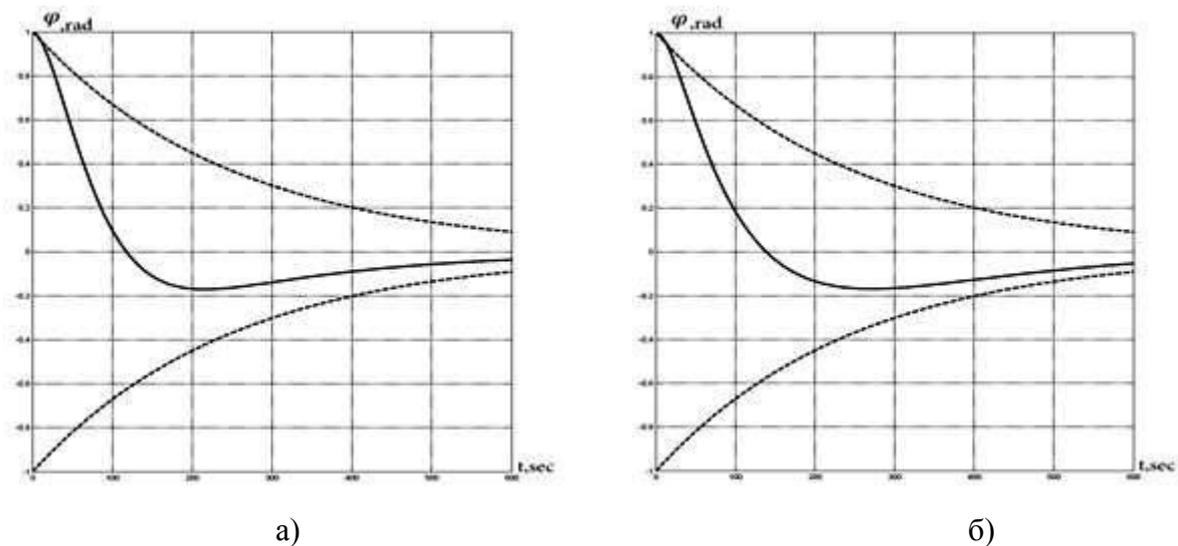
Задавая  $\alpha = 0.004$ , проверим положительность остальных определителей Гурвица:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= (T_{\Sigma \max} - 4T_{x \min} \alpha) * (6T_{x \min} \alpha^2 - 3T_{\Sigma \max} \alpha + T_{k \min}) - \\ & T_{x \max} * (3T_{\Sigma \min} \alpha^2 - 4T_{x \max} \alpha^3 - 2T_{k \max} \alpha + K_{1 \min}) = 20,8 > 0 \\ \Delta_3 &= ((T_{\Sigma \max} - 4T_{x \min} \alpha) * (6T_{x \min} \alpha^2 - 3T_{\Sigma \max} \alpha + T_{k \min}) \\ & * (3T_{\Sigma \min} \alpha^2 - 4T_{x \max} \alpha^3 - 2T_{k \max} \alpha + K_{1 \min})) \\ & - ((T_{\Sigma \max} - 4T_{x \min} \alpha)^2 \\ & * (T_{x \max} \alpha^4 - T_{\Sigma \min} \alpha^3 + T_{k \max} \alpha^2 - K_{1 \min} \alpha + K_{2 \max}) + T_{x \max} \\ & * (3T_{\Sigma \min} \alpha^2 - 4T_{x \max} \alpha^3 - 2T_{k \max} \alpha + K_{1 \min})^2) = 0,079 > 0 \\ \Delta_4 &= \Delta_3 * (T_{x \max} \alpha^4 - T_{\Sigma \min} \alpha^3 + T_{k \max} \alpha^2 - K_{1 \min} \alpha + K_{2 \max}) = \\ & = 0,0000012 > 0 \end{aligned}$$

Характеристики процесса  $x(t)$  при некоторых значениях параметров  $\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $k_c$  приведены на рисунке 1. Выходной сигнал системы ограничивается экспонентами, соответствующими выбранному параметру  $\alpha$ , показанному пунктиром.

Моделирование при граничных значениях интервальных параметров подтвердило, что ПИ-регулятор с выбранным коэффициентом передачи обеспечивает заданную степень устойчивости  $\alpha = 0,004$ .

Таким образом, применение теоремы Харитонова позволило синтезировать регуляторы выбранного вида, обеспечивающие не только робастную устойчивость системы управления курсом судна, но и назначенное качество переходных процессов.



**Рис. 1.** Процесс  $x(t)$  в системе управления с ПИ-регулятором, для  $\alpha = 0,004$ : а) при  $\tau_{0\max}=5\text{с}$ ;  $\tau_{1\max}=22\text{с}$ ;  $\tau_{2\max}=3\text{с}$ ;  $k_{\text{сmin}}=0,017\text{с}^{-1}$ , б) при  $\tau_{0\min}=8\text{с}$ ;  $\tau_{1\min}=12\text{с}$ ;  $\tau_{2\min}=12\text{с}$ ;  $k_{\text{сmax}}=0,014\text{с}^{-1}$

#### Литература

1. Лукомский Ю. А. и др. Навигация и управление движением судов: учебник. - СПб. : Элмор, 2002. - 360 с. : ил.
2. Харитонов В. Л. Об асимптотической устойчивости положения равновесия семейства систем линейных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 1978. № 11. — с.2086–2088.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 288 с.

УДК 004.94

**Оськин Дмитрий Александрович,**  
*к.т.н., доцент, доцент кафедры АИС, МГУ им. Г.И. Невельского*  
**Дьяченко Максим Евгеньевич,**  
*аспирант 2-го года обучения, МГУ им. Г.И. Невельского*

### **ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ МР**

Производительность манипуляционных роботов (МР) в значительной степени зависит от характеристик приводов. Задача синтеза систем управления приводом МР является достаточно сложной. Это объясняется нелинейной динамикой приводов, существенным изменением полезной нагрузки и пространственной конфигурации манипулятора, что ведет к вариациям моментов инерции исполнительных приводов, а также внешних моментов сил [1, 2].

При синтезе систем управления немаловажным фактором является апробация синтезированного закона управления на практике. Но это не всегда возможно, т.к. изготовление реальных стендов для исследования подобных систем является весьма затратным. В этом случае используют подход, связанный с моделированием. Как правило, при моделировании подобных систем используют упрощенные, линейные модели. Альтернативой использованию упрощенных моделей является разработка виртуальных стендов в среде моделирования Matlab с использованием подсистемы SimPowerSystems, что создает широкие возможности моделирования систем управления МР и исследования их характеристик.

## Релейные системы управления

Одним из подходов к синтезу систем управления приводами является использование релейных регуляторов. Эти регуляторы достаточно просты в реализации и обеспечивают эффект робастности с помощью релейной обратной связи [2].

На рис. 1 представлена типовая структурная схема привода МР, построенного на базе электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ).



**Рис 1.** Типовая структурная схема релейной системы управления приводом МР

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $\varphi_z$ ,  $\varphi$  – заданный и действительный угол поворота (рад),  $\omega$  – угловая скорость вращения (рад/сек),  $U$  – управляющий сигнал,  $M_{вн}$  – внешний момент.

Закон управления приводом МР формируется в виде релейной характеристики:

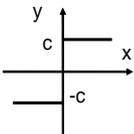
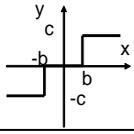
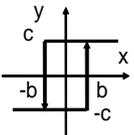
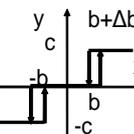
$$U = U_0 \cdot \text{relay}(s), \quad (1)$$

$$s = e + k \cdot \dot{e}$$

где  $s$  – уравнение функции переключения,  $k$  представляет собой коэффициент, характеризующий функцию переключения,  $U_0$  – величина управляющего сигнала,  $e = \varphi_z - \varphi$  – величина рассогласования.

Существует несколько видов релейных элементов (РЭ), используемых в релейных системах, их вид и математическое описание приведены в табл. 1.

## Характеристики релейных элементов

Релейный элемент	Математическое описание РЭ
1. идеальное двухпозиционное реле	
	$y = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ c \cdot \text{sign}(x), & x > 0 \end{cases}$
2. трехпозиционное реле	
	$y = \begin{cases} 0, &  x  \leq b \\ c \cdot \text{sign}(x), &  x  > b \end{cases}$
3. двухпозиционное реле с гистерезисом	
	$y = \begin{cases} c \cdot \text{sign}(x - b), & \dot{x} > 0 \\ c \cdot \text{sign}(x + b), & \dot{x} < 0 \end{cases}$
4. трехпозиционное реле с парным гистерезисом	
	$y = \begin{cases} c, & (x \geq b + \Delta b) \parallel (\dot{x} < 0 \ \& \ (b < x < b + \Delta b)) \\ 0, & (-b \leq x \leq b) \parallel \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} > 0 \ \& \ (b < x < b + \Delta b) \\ \dot{x} < 0 \ \& \ (-b - \Delta b < x < -b) \end{array} \right\} \\ -c, & (x \leq -b - \Delta b) \parallel (\dot{x} > 0 \ \& \ (-b - \Delta b < x < -b)) \end{cases}$

## Библиотека блоков SimPowerSystems

Библиотека блоков Matlab SimPowerSystems содержит набор блоков для моделирования электротехнических устройств, таких как источники электроэнергии, блоки управления электродвигателями постоянного и переменного тока, трансформаторы, линии передачи электроэнергии и элементы силовой электроники [3, 4].

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного подходов. При этом моделирование электротехнической составляющей системы выполняется с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а система управления с помощью обычных блоков Simulink. Также, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MatLab, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Рассмотрим возможности SimPowerSystems для создания виртуального стенда для моделирования релейной системы управления приводом МР (рис. 2).

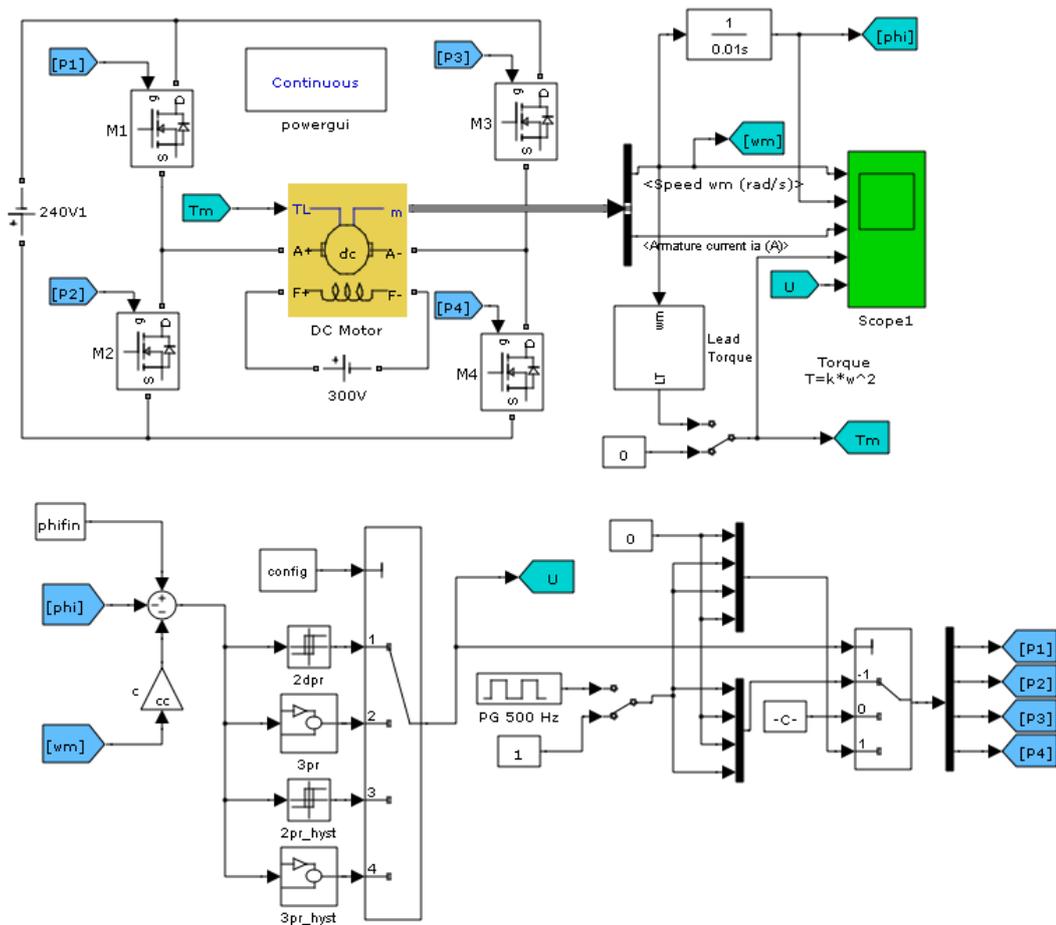


Рис. 2. Виртуальный стенд для исследования релейных систем

Структура стенда предполагает наличие управляющего m-файла и Simulink-модели. Управляющий файл предназначен для задания параметров модели, начальных и целевых условий и режимов моделирования. Simulink-модель содержит непосредственно структурную схему исследуемой системы (рис. 2).

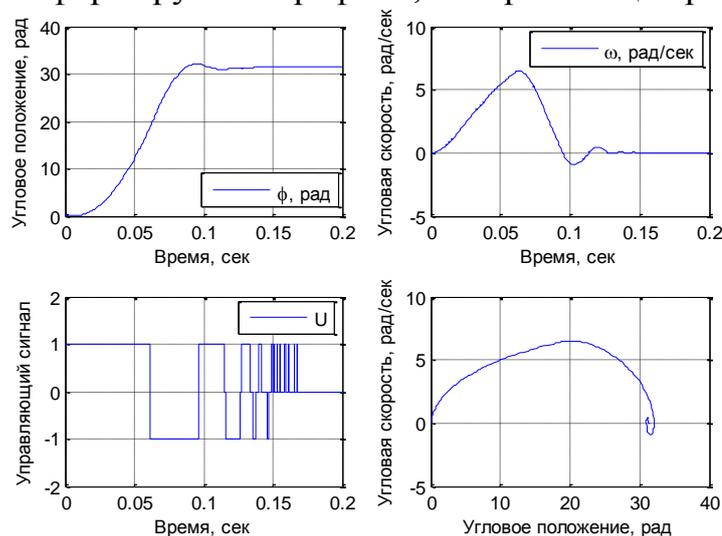
Модель ДПТ НВ представим блоком *DC Machine - Машина постоянного тока*. Порты блока A+ и A- являются выводами обмотки якорной цепи, порты F+ и F- представляют собой выводы обмотки возбуждения. Порт TL предназначен для подачи момента сопротивления движению (нагрузка формируется в блоке Lead Torque). На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из пяти элементов: скорости, токов якорной цепи и цепи возбуждения, электромагнитного момента и ускорения

В качестве схемы переключения воспользуемся мостовой H-схемой с управляемыми ключами (Mosfet транзистор M1 – M4). Управление ключами осуществляется попарно, управляющие сигналы формируются в блоках 2dpr (идеальное двухпозиционное реле), 3pr (трехпозиционное реле), 2pr\_hyst (двухпозиционное реле с гистерезисом), 3pr\_hyst (трехпозиционное реле с парным гистерезисом) и передаются на управляющие ключи че-

рез порты P1 - P4.

Заданный угол формируется блоком `phifin`, обратные связи по положению и скорости осуществляются через порты `phi` и `wm` соответственно. Релейные элементы `2dpr`, `3pr`, `2pr_hyst`, `3pr_hyst` собраны на базе блоков типа `relay`.

Выбор типа релейного элемента осуществляется путем задания значения переменной `config` в управляющем файле. Там же задаются параметры моделирования и формируются графики, отображающие результаты.



**Рис. 3.** Результаты моделирования

В качестве примера работы стенда приведены графики моделирования системы управления для трехпозиционного реле с парным гистерезисом (рис. 3). На рисунке приведены графики переходных процессов по положению, скорости, управляющий сигнал и фазовая траектория.

### Заключение

В статье рассмотрены возможности подсистемы Matlab SimPowerSystems для создания виртуальных стендов для моделирования релейных систем управления. Приведена структура релейной системы управления, типы релейных элементов. Описана схема виртуального стенда, порядок работы и формируемые результаты.

### Список литературы

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. Пер. с англ. под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989. 624 с.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники: учеб. для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
4. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.: ил.

**Оськин Дмитрий Александрович,**  
*к.т.н., доцент, доцент кафедры АИС, МГУ им. Г.И. Невельского*  
**Дьяченко Максим Евгеньевич,**  
*Аспирант 2-го года обучения, МГУ им. Г.И. Невельского*

## СИСТЕМА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ

В настоящее время актуальной проблемой современной теории управления является создание новых алгоритмов для управления сложными динамическими объектами. К таким объектам относятся промышленные манипуляционные роботы, подводные роботы-аппараты и др. Сложность управления такими объектами заключается в их существенной нелинейности, многосвязности, а также сложной динамикой взаимодействия с внешней (рабочей) средой. Приведенные факторы заставляют искать новые подходы к синтезу алгоритмов управления, сочетающих в себе качества эффективности и простоты реализации. Одним из подходов является синтез управления на основе систем с переменной структурой (СПС) [1, 2], в частности, релейных систем, представляющих собой класс систем с разрывной характеристикой.

В общем виде систему управления описывается уравнениями:

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u, \quad (1)$$

$$u = U_0 \cdot \text{relay}(s) \quad (2)$$

где  $x$  – вектор координат состояния,  $f$ ,  $g$  – гладкие вектор-функции,  $u$  – управляющий сигнал,  $U_0$  – амплитуда управляющего сигнала,  $s$  – функция поверхности переключения. Управляющие сигналы формируются в блоке релейного управления. Релейных элементов существует несколько разновидностей, среди них можно выделить идеальное двухпозиционное реле, трехпозиционное реле, двухпозиционное реле с гистерезисом, трехпозиционное реле с парным гистерезисом, также их комбинации и другие элементы [3, 4].

Рассмотрим возможность построения СПС для управления манипуляционным роботом (далее – МР).

### Модель динамики манипуляционного робота

В общем виде динамика МР робота описывается следующей моделью [5]:

$$D(q) \cdot \ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = M, \quad (3)$$

где  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  - векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений;  $D(q)$  - матрица, характеризующая инерционные свойства манипулятора;  $h(q, \dot{q})$  - вектор центробежных и кориолисовых сил манипулятора;  $g(q)$  - вектор гравитационных сил, действующих на звенья манипулятора;  $M$  - вектор управляющих моментов, развиваемых приводами манипулятора.

В качестве примера рассмотрим модель планарного двухзвенного МР (рис. 1). Для приведенного МР матрицы  $D(q)$ ,  $h(q, \dot{q})$ ,  $g(q)$  имеют вид [5]:

$$D(q) = \begin{bmatrix} ((m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos(q_2)) & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(q_2) \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(q_2) & m_2l_2^2 \end{bmatrix},$$

$$h(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2 \sin(q_2)(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\ -m_2l_1l_2 \sin(q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2 \end{bmatrix},$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} -(m_1 + m_2)gl_1 \sin(q_1) - m_2gl_2 \sin(q_1 + q_2) \\ -m_2gl_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix},$$
(4)

где  $m_1, m_2$  - массы звеньев,  $l_1, l_2$  - длины звеньев.

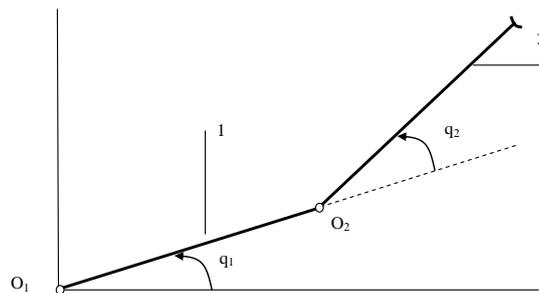


Рис. 1. Двухзвенный МР

### Система управления МР

Рассмотрим алгоритм работы системы управления МР (рис. 2). В вычислительном устройстве формируется величина  $s_i = e_i - c_i \cdot \dot{e}_i$ , которая поступает в релейное устройство, где в соответствии с его алгоритмом работы формируется управляющий сигнал (2),  $e_i = \varphi_{id} - \varphi_i$  - величина рассогласования.

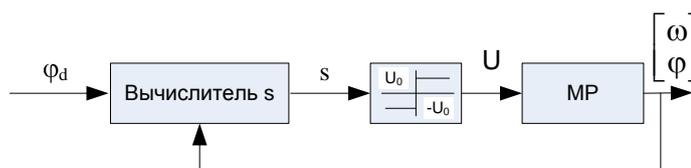
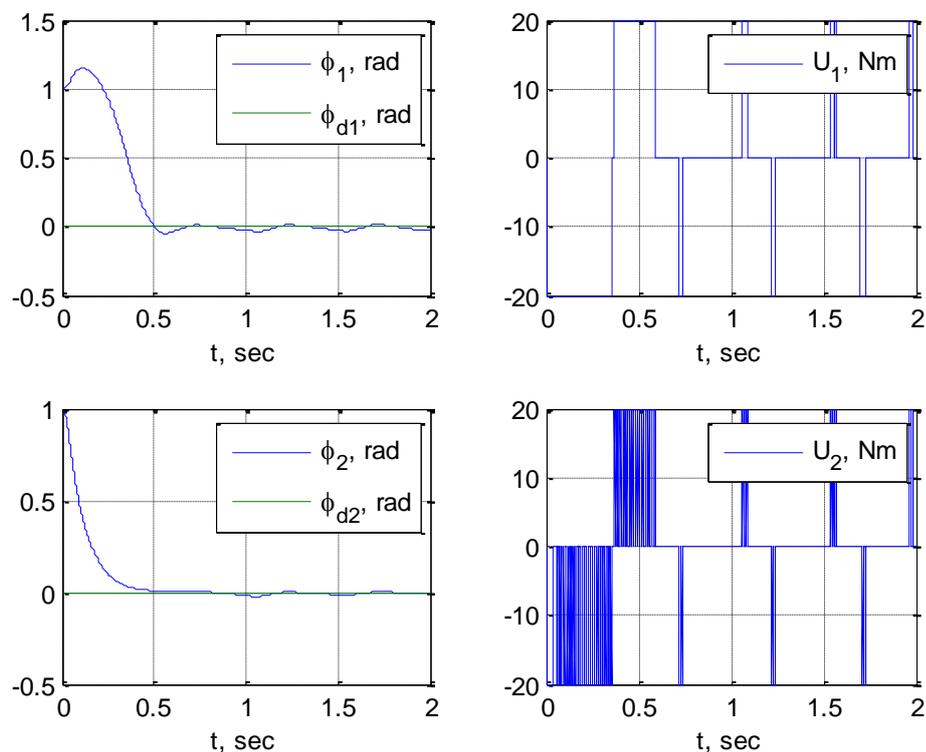


Рис. 2. Структурная схема СПС МР

Для моделирования системы управления МР рассмотрим режим свободного движения. На рис. 3 приведены графики переходных процессов и управляющие сигналы.



**Рис 3.** Графики переходных процессов и управляющие сигналы

#### Список литературы

1. Теория систем с переменной структурой / под ред. С.В. Емельянова. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970 – 592 с.
2. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974 – 368 с.
3. Афанасьев А.А, Евграфов А.В. Математические основы теории систем управления. Раздел третий: Элементы теории нелинейных систем автоматического управления: Учеб. пособие. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. 90с.
4. Мирошник И.В. Теория автоматического управления: Нелинейные и оптимальные системы. – СПб.: Питер, 2006.-272 с.: ил. - (Серия «Учебное пособие»).
5. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. Пер. с англ. под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989. 624 с.

**Павликов Сергей Николаевич,**  
*к.т.н., зав. каф. РЭРС, профессор, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*  
**Максеев Антон Сергеевич,**  
*студент 4-го курса, ВГУЭС*  
**Пашкеев Сергей Владимирович,**  
*начальник учебного отдела кафедры, ДВФУ*  
**Убанкин Евгений Иванович,**  
*к.т.н., доцент, доцент кафедры РЭРС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ В ЗОНЕ НЕУВЕРЕННОГО ПРИЕМА**

Актуальность выбора темы обуславливается тем, что в современных условиях даже короткое прерывание связи по причине отсутствия сигнала является серьезной проблемой. Целью данной работы является поиск технических решений по обеспечению надежной и устойчивой мобильной связи в теневой зоне. В соответствии с поставленной целью предусматривается решение следующих задач: анализ проблемы, разработка вариантов её решения, определение состава оборудования, расчет, моделирование и выбор наиболее эффективного приемопередающего устройства активно-пассивной подсветки зоны неуверенного приема и его размещения для конкретного объекта. Качество связи растет, тем не менее ситуация далека от идеальной, особенно в городах с большим высотным разбросом. На качество связи влияют следующие факторы [1,2]:

- местоположение базового (БС) и мобильной (МС) станций, а также рельеф трассы и окружающего пространства;
- мощность каналов передачи;
- чувствительность приемников (БС и МС);
- помехоустойчивость приемников (БС и МС);
- характеристики и ориентация используемых на МС и БС антенн;
- наличие экранирующих элементов трасс;
- динамика изменения уровней шумов в диапазонах радиостанций;
- нелинейность динамики взаимного перемещения абонентов и другие естественные и искусственные явления и др.

Известны несколько способов обеспечения мобильной связи в зонах неуверенного приема [3-5]:

- разнесенный прием;
- применение антенн с большим коэффициентом усиления;
- использование усилителей сигнала в передатчике и приемнике;
- применение ретрансляторов;
- использование технологии ММО.

Применение направленных, адаптивных и пространственно-распределенных антенн наиболее распространенный подход, выбор того или иного метода, а также комплексное решение с применением ряда технологичных и ресурсных затрат. Чаще всего антенна устанавливается в месте уверенного приёма (на мачте чем выше, тем больше геометрическая дальность радиосвязи). Посредством кабеля и антенного адаптера антенна подключается к радиостанции или модему. Достоинствами способа являются низкая цена, простота установки и подключения. Недостаток – ограниченность длины кабеля (из-за быстрого затухания сигнала).

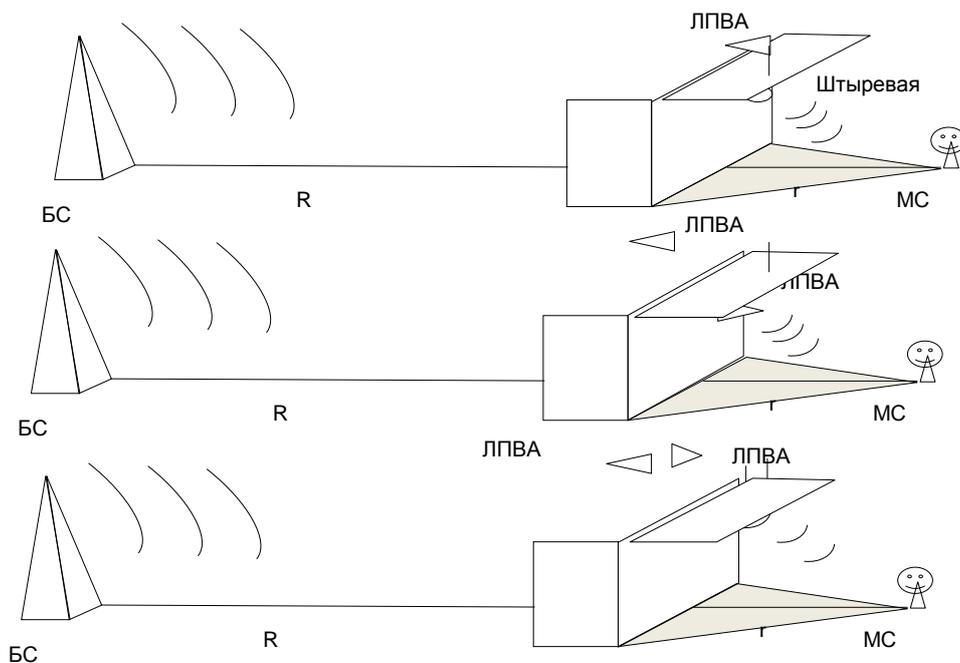
Во втором способе, в системе, состоящей из усилителя и внешней антенны, антенна, также установленная в месте уверенного приёма, посредством кабеля соединяется с усилителем. Усилитель соединен с антенным адаптером, который подключается к радиостанции или модему. Достоинства и недостатки этого способа аналогичны достоинствам и недостаткам первого способа, хотя, благодаря усилителю, дальность и качество связи существенно возрастают.

В случае применения ретранслятора антенна, также установленная в месте наибольшего сигнала приёма, посредством кабеля соединяется с усилителем и еще одной антенной. Достоинствами этого способа являются незаметность ее работы для пользователей, эффективное усиление радиосигнала, и, как следствие, минимизация радиоизлучения. Недостатки: более сложная установка оборудования и большая стоимость, чем в предыдущих способах.

Таким образом, наиболее эффективный способ – установка ретранслятора. Принцип работы ретранслятора широко известен и достаточно подробно в доступной литературе. В данной работе предлагается исходя из конструкции и свойств антенн, в качестве внешней антенны использовать логопериодическую антенну (далее – ЛПВА), а в качестве внутренней антенны – штыревую (для помещений) или ЛПВА (для открытых пространств). Логопериодическая антенна является широкополосной. Она обладает неизменной направленностью и коэффициентом усиления в широком диапазоне частот. Для радиостанции наиболее подходящей является штыревая антенна. Основное ее достоинство - наличие круговой диаграммы направленности, благодаря чему поддерживается неизменный уровень сигнала в антенне для мобильного потребителя.

При выборе оптимального способа обеспечения связи, были рассмотрены следующие варианты расположения антенн (рис. 1):

- ЛПВА, установленная на крыше для связи с базовой станцией (далее – БС), и штыревая антенна на стене для связи с мобильной станцией (далее – МС);
- ЛПВА на крыше для связи с БС и ЛПВА на стене для связи с МС;
- ЛПВА на крыше для связи с БС и ЛПВА на крыше для связи с МС.



**Рис. 1.** Варианты расположение антенн

Для выбора оптимального варианта расположения антенн, их параметры были рассчитаны методом последовательных приближений [5], а сами антенны были смоделированы в программе MMANA –Gal\_basic. Результаты приведены в таблице 1 и на рисунках 2-5.

*Таблица 1*

**Размеры логопериодической антенны**

Номер вибратора	Длина плеча вибратора, м	Расстояние между вибраторами, м
1	0,039	0,008
2	0,036	0,031
3	0,033	0,028
4	0,030	0,026
5	0,028	0,024
6	0,025	0,022
7	0,023	0,020
8	0,021	0,018

Характеристики:

- нижняя граничная частота  $F_{\min}$  - 1950 МГц;
- верхняя граничная частота  $F_{\max}$  - 2155 МГц;
- число вибраторов  $N=8$ ;
- параметр  $\tau$  - 0.917;
- средний КСВ в рабочем диапазоне - 1.168;
- средний коэффициент усиления в рабочем диапазоне - 16.7 dB;
- входное сопротивление - 50 Ом;

– длина антенны - 0.169 м.

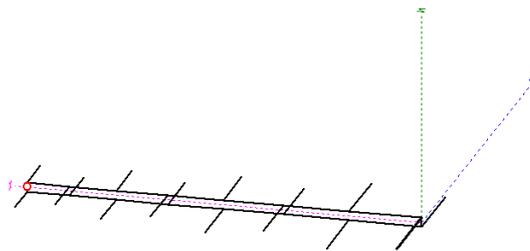


Рис. 2. Полученная модель ЛПВА

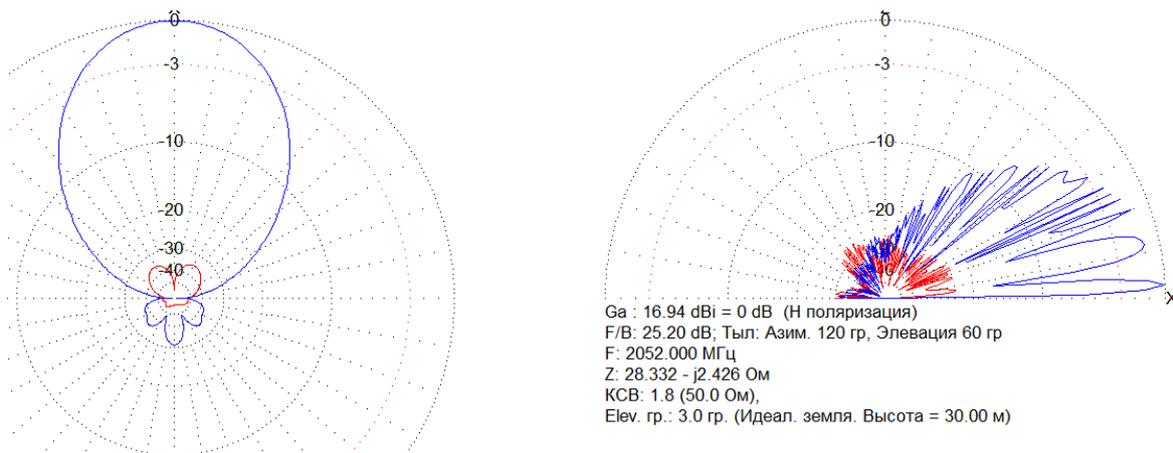


Рис. 3. Диаграмма направленности ЛПВА на частоте  $F_c=2052$  МГц

Окончательные параметры смоделированной ЛПВА – на рисунке 4.

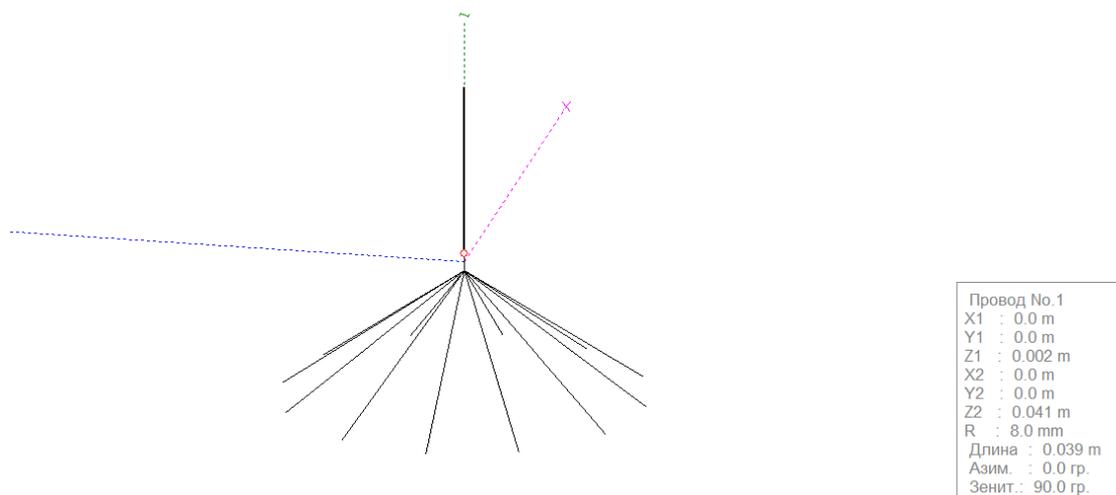
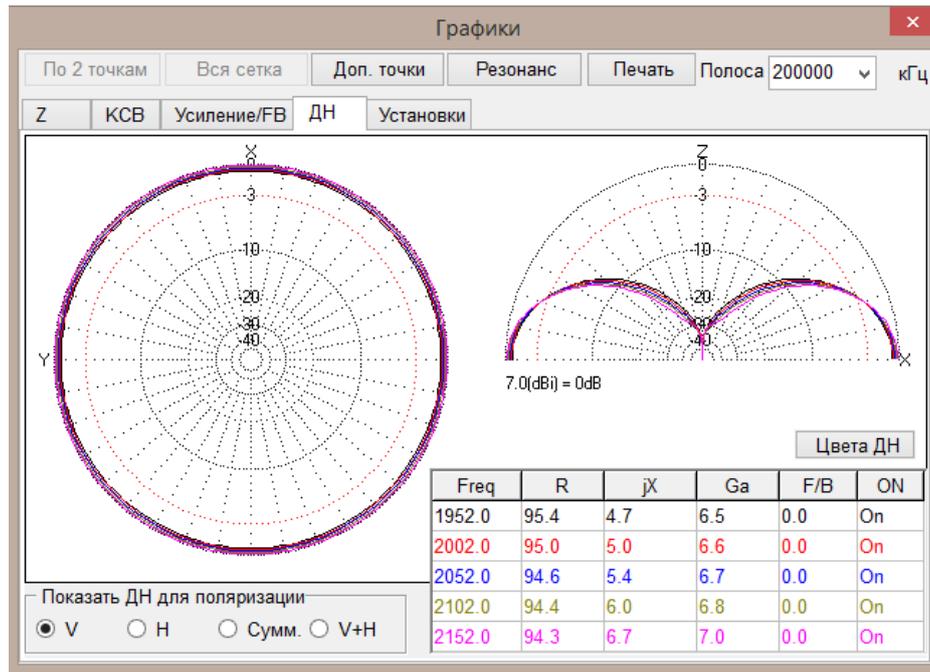


Рис. 4. Модель штыревой антенны с противовесами

Окончательные параметры штыревой антенны:

- диапазон частота: 1950 - 2155 МГц;
- средний КСВ в рабочем диапазоне - 1.04;
- средний коэффициент усиления в рабочем диапазоне – 6,71 dB;
- входное сопротивление - 50 Ом,;

- длина антенны - 0.039 м.



**Рис. 5.** Диаграммы направленности штыревой антенны с противовесами для различных частот

Конструктивно данная антенна сложнее своих промышленных аналогов, но именно это позволяет получить такой высокий коэффициент усиления и низкий КСВ антенны. Используя полученные параметры антенн, можно рассчитать мощность связи, обеспечиваемую каждым вариантом расположения антенн. Расчет мощности сигнала на внешней антенне. Пусть девятиэтажный дом находится между базовой станцией и абонентом, тем самым создавая теневую зону на расстоянии 3 км от БС. Исходные данные расчета:

- $R = 3$  км – расстояние от базовой станции до приемной антенны;
- $P_T = 30$  дБм – среднестатистическая мощность базовой станции [3];
- $G_T = 12$  дБ – среднестатистический коэффициент усиления БС [3];
- $G_R = 16.7$  дБ – средний коэффициент усиления ЛПВА.

Рассчитаем мощность сигнала на крыше дома [1,2]:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L,$$

где  $L$  – коэффициент рассеивания сигнала по дальности [3]

$$L = 20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda}, \quad L = 20 \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^3}{0.156} = 107, \text{ дБ}$$

$$P_R = 30 + 12 + 16.7 - 107 = -48.3 \text{ дБм}$$

Согласно требованиям обеспечения надежности связи, сигнал подходит под определение отличного (мощность выше минус 60 дБм).

Пусть теньевая зона в исследуемой зоне представляет собой треугольник (рис. 1), тогда получим:

- $R$  – расстояние от дворовой антенны до МС;
- $P_T = -48.3$  дБм – мощность сигнала на внешней антенне;
- $G_T$  – коэффициент усиления «дворовой» антенны;
- $G_{MC} = 3$  дБ – коэффициент усиления антенны МС;
- $h_1 = 30$  м – высота расположения ЛПВ антенны на крыше;
- $h_2$  – высота расположения антенны во дворе;
- $X = \alpha(h_1 - h_2)$  – потери мощности в проводах, где  $\alpha = 1.2$  дБ/м – погонное затухание в кабеле передающего тракта.

Мощность сигнала в точке приема равна [3]:

$$P_r = P_T + G_{MC} + G_r - X - L,$$

где  $L = 20 \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot R}{0.156}$  – рассеяние сигнала в воздухе.

Таблица 2

#### Характеристики вариантов расположения антенн

Параметр антенны	Штыревая антенна	ЛПВА, на стене здания	ЛПВА, на крыше
$h_2, \text{м}$	20	20	30
$R, \text{м}$	28,28	28,28	36,06
$L, \text{дБ}$	69,26	69,26	67,15
$X, \text{дБ}$	12	12	2,4
$G_r, \text{дБ}$	6,71	16,7	16,7
$P_r, \text{дБ}$	-119,85	-109,86	-98,15

Как видно из таблицы 2, полученной мощности сигнала все еще не хватает для обеспечения удовлетворительного уровня сигнала. Добавив промышленный усилитель сигнала (с плоской АЧХ и мощностью от 50 дБ) в теньевой зоне, можно получить требуемый уровень сигнала. Кроме того, из таблицы видно, что оптимальной по уровню сигнала будет система из двух широкополосных (например, логопериодических) антенн, размещенных на крыше на расстоянии друг от друга. Одна из антенн направлена на БС, а другая – в зону предположительного нахождения мобильной станции потребителя.

Таким образом, моделирование вариантов «освещения» теньевой зоны позволяет определить приемлемое техническое решение по указанным выше параметрам.

#### Список литературы

1. Утц В. А. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей / В.А.Утц// Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта. 2011. Вып. 5. - С. 44—49.
2. Ерохин Г.А. Прогнозирование теньевых зон при расчете поля УКВ в системах подвижной радиосвязи [Электронный ресурс] / К.К. Богенс, Г.А. Ерохин, О.А. Шорин //

Московский технический университет связи и информатики – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/win/jul00/3/text.html>

3. Галушко О.М. Методика определения границ «теневых» зон для одиночных препятствий в сотовых системах связи стандарта GSM [Электронный ресурс]/О.М. Галушко, Д.В. Коломбарь // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Режим доступа: <http://jurnal.org/articles/2013/radio3.html>

УДК 621.32

***Павликов Сергей Николаевич,***

*к.т.н., зав. каф. РЭС, профессор, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

***Пузин Олег Владимирович,***

*начальник кафедры, ДВФУ,*

***Пашкев Сергей Владимирович,***

*начальник учебного отдела кафедры, ДВФУ*

***Убанкин Евгений Иванович,***

*к.т.н., доцент, доцент кафедры РЭС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА**

В последнее время, по мере увеличения интенсивности воздушных сообщений с одной стороны и использования более габаритных воздушных судов пространственно-временной интервал возрастает. Период посадки и взлета самолетов увеличивает. Возросшее число аварий по причине воздействия воздушных потоков на самолет ведет к пересмотру рекомендаций ИКАО, без учета реальной обстановки, что в свою очередь снижает рентабельность аэропорта. Становится очевидной экономическая целесообразность разработки и использования технологий для оценки степени угрозы атмосферных явлений воздушному судну и разработки рекомендаций для действий экипажа и диспетчерской службы. Однако реализовать это можно только при наличии эффективной системы радиолокационного наблюдения атмосферных явлений и прогнозирования степени их опасности для воздушного судна [1, 2].

Техническое наблюдение может состоять из наблюдения с помощью бортового оборудования, с помощью аэродромного комплекса и совместно. Оценка опасности включает два основных направления – оперативное и прогнозируемое. В дополнении к основным задачам бортового оборудования воздушного судна следует добавить задачи своевременного обнаружения опасных природных явлений с заданными вероятностными характеристиками, оценки степени угрозы для конкретного типа носителя и выработки рекомендаций для выхода из аварийной ситуации.

В настоящее время бортовое радиолокационное оборудование (РЭС) является основным средством получения информации о традиционных

объектах в окружающем пространстве. РЭС не в полной мере соответствуют современным требованиям, связанным с возросшим влиянием атмосферных явлений на безопасность воздушного судна [1-3]. Это определяет сложившуюся структуру обеспечения безопасности в системе управления воздушным движением. Следствием такого подхода является высокая стоимость систем технического наблюдения при низкой его эффективности в случае формирования атмосферных явлений в условиях неопределенности контролируемых параметров, моделей, типов объектов, участвующих в их формировании. Прогноз, являясь вторичным фактором, не может обеспечить требуемую безопасность.

Одним из путей решения проблемы является развитие методов и средств радиоэлектронного наблюдения.

Оперативное наблюдение является основным условием для перехода к обслуживанию воздушных судов по состоянию трассы. Основой системы оперативного наблюдения являются методы раннего обнаружения явлений, опасных для воздушного судна, осуществляющего маневрирование по скорости, курсу и высоте.

Анализ аварийности воздушных объектов показывает, что существует группа факторов, которые:

- во-первых, не выявляются традиционными методами и устройствами;
- во-вторых, усиливаются при увеличении массогабаритных характеристик самолетов, летящих впереди по курсу воздушного судна;
- в-третьих, не могут быть инструментально документированы для анализа и обобщения опыта, с целью прогнозирования и выработки рекомендаций.

Технически сложное проведение исследований, высокие материальные затраты, большие временные интервалы между замерами с одной стороны, и огромный материальный ущерб в случае аварии с другой, обуславливают необходимость разработки принципиально нового простого и недорогого метода наблюдения и оценки степени опасности трассы при минимальном вмешательстве человека в процесс функционирования.

Таким образом, исследования, направленные на разработку новых научно-практических технологий для оперативного с высокой вероятностью дистанционного обнаружения опасных атмосферных возмущений для безопасности полета воздушного судна, позволяющих определить степень их опасности заблаговременно, являются актуальными и практически значимыми.

Проблема – несоответствие радиоэлектронного оборудования (РЭО) для обеспечения безопасности полета воздушного судна современным требованиям.

Предметом исследования является бортовое РЭО для обеспечения безопасности полета воздушного судна.

Объектом исследования являются методы обнаружения опасных атмосферных возмущений для безопасности полета воздушного судна.

Целью исследования является повышения вероятности радиолокационного обнаружения атмосферных возмущений опасных для воздушного судна.

Актуальность исследований обусловлена [1- 3]:

– не соответствием существующих методов и средств контроля окружающей среды. Используемые технологии не способны обеспечить своевременное при заданных дальности и вероятностных характеристиках обнаружение воздушных явлений, представляющих угрозу воздушному судну. Они не могут с заданной вероятностью определять и прогнозировать состояние атмосфер впереди по курсу движения воздушного судна, что требует создания новых или усовершенствованных технологий радиолокационного наблюдения;

– необходимостью прогнозирования состояния трассы.

Анализ состояния дел в исследуемой предметной области. В настоящее время значительная часть бортового РЭО формировалось в течение длительного времени и по принципу адаптации к новым условиям и требованиям с целью обеспечения безопасности полетов. Современный парк воздушных судов быстро меняется с возрастанием массогабаритных характеристик и мощности двигателей. Природные явления с каждым годом носят всё более разрушающий характер. Используемое РЭО построено на принципах 50-х годов и в последние годы улучшается в расширении функциональных, как правило, сервисных возможностей. Вместе с тем существующая система сбора и обработки данных показывает несоответствие возможностей РЭО требованиям контроля явлений, способных перерасти в опасные для воздушного судна в ситуациях слабого управления в период маневра на малых высотах.

Это объясняется рядом причин [1-4], а именно:

– во-первых, существующие РЛС не способны обнаруживать объекты, обладающие слабой отражающей способностью.

– во-вторых, технология обработки отраженных сигналов в бортовой РЛС оптимизирована к сигналам с малой базой;

– В-третьих, каждый из измеренных параметров атмосферного явления дает лишь среднюю характеристику, а для оценки степени угрозы нужны показатели для индивидуального воздушного судна на борту которого ведется наблюдение в его интересах.

– В-четвёртых, налажена преимущественно аварийная статистика, затруднено получение информации об условиях, приведших к потере управляемости воздушного судна.

Для контроля окружающего пространства применяются такие методы, как оценка интенсивности отражения для лидара, радара или визуального наблюдения оператором. Известны методы увеличения контраста наблюдаемых явлений.

Однако эти методы не позволяют оперативно днем и ночью в любую погоду обеспечить обнаружение опасных атмосферных явлений и оценить степень их опасности для конкретного самолета.

Использование методов и средств технического наблюдения за природными явлениями на трассе и зоне движения самолета представляют собой технологию дальнейшего повышения информативности РЭО в интересах безопасности воздушного движения, особенно в условиях высокой её интенсивности в зоне аэропорта.

Его необходимость вызвана тем, что не все атмосферные явления могут быть обнаружены современными РЛС и тем более не могут оценить опасность для индивидуального самолета и контролировать изменение этой опасности во времени и в пространстве.

Система штатного РЭО современных самолетов, как правило, не предназначена для обнаружения кратковременных, быстро меняющихся и перемещающихся зон опасности для воздушного судна. Ответственной задачей является разработка новых методов и средств сбора, анализа, документирования информации об атмосферных явлениях в зоне конкретно аэродрома, способствующей раннему выявлению опасных ситуаций, которые могут быть целенаправленно изменены в интересах безопасности воздушного движения.

Раннее обнаружение и оценка степени угрозы – это лишь первый этап необходимого информационного обеспечения процессов управления воздушным судном. Предложенные технологии позволят решать аналогичные задачи радиолокационным комплексом аэродрома и обеспечивать борт судна требуемой для принятия адекватного решения в сложившейся ситуации.

Совокупность этих технологий позволяет обоснованно выбрать оптимальный вариант технического построения комплекса средств ОВД и бортового оборудования. За рубежом проблема стоит еще острее с учетом более быстрых процессов по обновлению пака воздушных судов и более интенсивных потоков воздушного сообщения при ограниченных и, как правило, застроенных пространствах в районе городов.

За рубежом поставленная задача не решена в связи с тем, что для этого необходимо построение нелинейных моделей в условиях сильных помех от местных предметов. У автора имеется научный задел по построению моделей адекватных изменившимся условиям, новым объекту и предмету исследования.

#### *Новизна проводимых исследований [4].*

В ходе выполнения НИР по данной теме исследованы методы описания вторичных электромагнитных процессов при наблюдении их радиолокатором за предполагаемой зоной движения воздушного судна, разработаны способы обнаружения и оценки степени угрозы воздушному судну, разработано устройство обнаружения и контроля опасных атмосферных явлений, структура перспективного комплекса бортового РЭО.

Назрела необходимость решения следующих задач:

– создать концепцию системы информационного обеспечения безопасности воздушного судна в условиях маневрирования на малых высотах;

- обосновать модели эхо-сигналов от опасных атмосферных явлений;
- обосновать и разработать метод обнаружения опасных атмосферных явлений;
- разработать технические требования к средствам технического обнаружения и контроля опасных атмосферных явлений;
- обосновать и разработать методики проведения измерений;
- обосновать оптимальный состав бортового комплекса РЭО для судов разных классов и рекомендации по практическому использованию РЭО.

Основная цель работы – теоретическое обоснование и выявление качественно нового способа исследования окружающего пространства при распознавании опасных для воздушного судна явлений.

#### *Ожидаемые конечные результаты*

В результате выполнения работ [4 - 6]:

- формируется концепция системы информационного обеспечения безопасности воздушного судна в условиях маневрирования на малых высотах;
- обоснована модель эхо-сигналов от опасных атмосферных явлений;
- разработан метод обнаружения опасных атмосферных явлений;
- разработано техническое задание на ОКР средств технического обнаружения и контроля опасных атмосферных явлений;
- разработана методика проведения экспериментов;
- обоснован оптимальный состав бортового комплекса РЭО для воздушных судов различных классов, в который войдет средство технического обнаружения и контроля опасных атмосферных явлений;
- разработаны рекомендации по практическому использованию предложенного технического решения;
- предложен алгоритм расчета вариантов безопасного уклонения от большого количества быстро маневрирующих объектов.

Выполнение предлагаемой НИР позволит создать предпосылки для качественного скачка в области разработки методов и средств повышения эффективности обнаружения опасных атмосферных возмущений для безопасности полета воздушного судна на новых (не традиционных) принципах, критериях и методиках.

Состав аппаратуры, оборудования и методического обеспечения системы (технического решения) позволит получать необходимые данные для контроля зоны прогнозируемого движения воздушного судна с целью своевременного обнаружения опасных атмосферных явлений и оценки степени угрозы для конкретного воздушного судна.

Использование предлагаемого технического решения позволит:

- снизить аварийность воздушных судов при маневрировании на малых высотах от воздействия атмосферных нелинейных процессов на самолет;
- повысить эффективность использования аэродрома за счет контроля обстановкой и адекватного управления воздушным движением до потенциальной пропускной способности взлетно-посадочной полосы;
- повысить дальность обнаружения опасных атмосферных явлений при заданных вероятностях обнаружения и ложной тревоги до требуемой ИКАО для гражданских воздушных судов и не менее 1000 м для самолетов и вертолетов;
- повысить до 0.98 вероятность правильного решения по оценке степени угрозы атмосферного явления для конкретного воздушного судна, параметров его движения и условий в районе наблюдения;
- выполнять аэродромным радиолокационным комплексом диагностику посадочных маршрутов и степень соответствия оборудования аэродромов;
- оперативно обнаруживать и отображать границы опасных зон для самолетов в процессе боевого маневрирования в тесной группе самолетов на малых расстояниях друг относительно друга и вблизи границ зон маневрирования;
- повысить до 0.97 вероятность обнаружения разрабатываемых перспективных малозаметных (беспилотных) объектов с малой отражающей способностью первичного и вторичного полей на фоне разной интенсивности.

#### Список литературы

1. Самойлов Л.К. Электронное управление характеристиками направленности антенн. Л.: Судостроение, 1987.- 280 с.
2. Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Перспективные методы обработки сигналов в телекоммуникационных системах.– Владивосток: Мор. гос. ун-т. 2014.–99с.
3. Сапрыкин В.А., Рокотов С.П. Теория гидроакустики и цифровая обработка сигналов., 2 часть – Л.: ВВМУРЭ, 1991 – 416 с.
4. Свидетельство на полезную модель 67289, Россия, Радиолокационный комплекс обнаружения и сопровождения объектов /Павликов С.Н., Убанкин Е.Н. и др. – Бюл. изобр. 2007.
5. Свидетельство на полезную модель 68710, Россия, Радиолокационный комплекс обнаружения и сопровождения объектов /Павликов С.Н. и др. – Бюл. изобр. 2007.
6. Свидетельство на полезную модель 16576, Россия, Устройство передачи и приема информации /Павликов С.Н., Убанкин Е.Н. и др. – Бюл. изобр. 2001, №1.

**Пашин Сергей Сергеевич,**  
 ассистент кафедры АСУ, ДВФУ,  
 e-mail: aych@ya.ru

**Бушко Дмитрий Алексеевич,**  
 ассистент кафедры АСУ, ДВФУ  
 e-mail: fareastnealle@ya.ru

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ МПО ПО КУРСУ И КРЕНУ

Полная математическая модель пространственного движения МПО, содержит двенадцать нелинейных дифференциальных уравнений и мало пригодна для исследования систем управления МПО. Её анализ настолько сложен, что не позволяет восстановить общую картину процессов управления движением.

Структура и алгоритмы систем управления непосредственно зависят от структуры исходных математических моделей. Синтез по упрощенным моделям приводит к более простым структурным решениям, доступным для технической реализации, и технологичным в изготовлении и настройке. Причем упрощения систем заметных потерь с точки зрения качества управления не вызывают.

В связи с этим вопросы упрощения математического описания движения МПО весьма важны. Решение достигнуто путем перехода к линейным моделям и разделением движений [1].

В качестве исследуемой, возьмем модель динамики МПО, представляющую из себя систему двух дифференциальных уравнений второго порядка описывающих зависимость курса и крена (1).

$$\begin{cases} T_c \ddot{\varphi} + \dot{\varphi} = K\delta \\ T_{kp} \ddot{\theta} + \dot{\theta} + K_g \theta = K_v \sigma \dot{\varphi} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\delta$  - угол поворота руля,  $\varphi$  - курс,  $\theta$  - крен,  $\sigma$  - скорость движения,  $T_c$ ,  $K$ ,  $T_{kp}$ ,  $K_v$ ,  $K_g$  - константы описывающие МПО.

Существенной причиной неопределенности динамики МПО является как неточность и неполнота информации об объекте и условиях его функционирования, так и погрешность измерений, используемых для формирования управляющих воздействий в процессе движения, неполнота знаний о внешних возмущениях. Традиционно для синтеза качественной системы управления требуется знание параметров управляемого объекта, т.е. решение задачи параметрической идентификации.

При решении задачи адаптивной идентификации использовался алгоритм скоростного градиента. Суть метода заключается в следующем: на-

стройка параметров осуществляется в направлении, противоположном скорости изменения целевого функционала вдоль траектории обобщенного настраиваемого объекта[2].

Предполагается, что динамический объект управления определен уравнением

$$\dot{x} = F(x, p, t) \quad (2)$$

где  $x$  - вектор состояния управляемого объекта,  $p$  - вектор его параметров.

Целью управления является минимизация функции:

$$Q = Q(x, t) \rightarrow \min \quad (3)$$

На первом шаге алгоритма метода скоростного градиента вычисляется скорость изменения  $Q(x, p, t)$  вдоль траектории, определяемой уравнением (2):

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{\partial Q}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Q}{\partial x_i} F_i(x, p, t) \quad (4)$$

Следующий шаг – нахождение градиента для полученной производной по настраиваемым параметрам:

$$\frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial p} = \left( \frac{\partial \dot{Q}}{\partial p_1} \dots \frac{\partial \dot{Q}}{\partial p_n} \right) \quad (5)$$

В заключение для минимизации целевой функции выполняется настройка вектора изменяемых параметров в направлении, противоположном скоростному градиенту:

$$\frac{dp}{dt} = -\Gamma \frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial p} \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – симметрично положительно определенная, диагональная матрица:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_n \end{pmatrix},$$

Коэффициенты  $\gamma_i$  обуславливают скорость адаптации настраиваемых параметров.

Приведем систему (1) к нормальной форме коши и произведем замену переменных:

$$\begin{cases} T_c \dot{x}_1 + x_1 = K\delta \\ T_{kp} \dot{x}_2 + x_2 + K_g x_3 = K_v \sigma x_1 \\ \dot{x}_3 = x_2 \end{cases} \quad (6)$$

где  $x_1 = \varphi$ ,  $x_2 = \dot{\theta}$ ,  $x_3 = \theta$ .

Приведем систему уравнений (6) к виду (2) и произведем замену констант:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -A_1 x_1 + A_2 \delta \\ \dot{x}_2 = B_1 \sigma x_1 - B_2 x_2 - B_3 x_3 \\ \dot{x}_3 = x_2 \end{cases} \quad (7)$$

где  $A_1 = \frac{1}{T_c}$ ,  $A_2 = \frac{K}{T_c}$ ,  $B_1 = \frac{K_v}{T_{kp}}$ ,  $B_2 = \frac{1}{T_{kp}}$ ,  $B_3 = \frac{K_g}{T_{kp}}$

Выберем настраиваемую модель в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1M} = -A_1 x_{1M} + A_2 \delta + v_1 \\ \dot{x}_{2M} = B_1 \sigma x_{1M} - B_2 x_{2M} - B_3 x_{3M} + v_2 \\ \dot{x}_{3M} = x_{2M} + v_3 \end{cases} \quad (8)$$

где  $v_1, v_2, v_3$  - вспомогательный сигнал.

Введем дополнительную переменную, описывающую разность состояния объекта и модели:

$$E = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - x_{1M} \\ x_2 - x_{2M} \\ x_3 - x_{3M} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Определим целевую функцию:

$$Q = \frac{1}{2} E^T E \quad (10)$$

Вычислим производную целевой функции по времени, воспользовавшись уравнениями (7), (8) и (9):

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= e_1(x_1 - x_{1M}) + e_2(x_2 - x_{2M}) + e_3(x_3 - x_{3M}) = \\ &e_1(-A_1x_1 + A_2\delta - A_1x_{1M} + A_2\delta + v_1) + \\ &e_2(B_1\sigma x_1 - B_2x_2 - B_3x_3 - B_1\sigma x_{1M} - B_2x_{2M} - B_3x_{3M} + v_2) + \\ &e_3(x_2 - x_{2M} + v_3) \end{aligned} \quad (11)$$

Выполним дифференцирование по параметрам настраиваемой модели:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial A_{1M}} &= e_1x_{1M}; \quad \frac{\partial \dot{Q}}{\partial A_{2M}} = -e_1\delta; \quad \frac{\partial \dot{Q}}{\partial B_{1M}} = -e_2\sigma x_{1M}; \\ \frac{\partial \dot{Q}}{\partial B_{2M}} &= e_2x_{2M}; \quad \frac{\partial \dot{Q}}{\partial B_{3M}} = e_2x_{3M}; \end{aligned} \quad (12)$$

В результате алгоритм настройки адаптивной нелинейной идентифицирующей модели может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \dot{A}_{1M} &= -\gamma e_1x_{1M}; \quad \dot{A}_{2M} = \gamma e_1\delta; \quad \dot{B}_{1M} = \gamma e_2\sigma x_{1M}; \\ \dot{B}_{2M} &= -\gamma e_2x_{2M}; \quad \dot{B}_{3M} = -\gamma e_2x_{3M}; \quad \dot{v} = \gamma v_0; \end{aligned} \quad (13)$$

Как показано в [3], при определенных условиях имеет место следующее идентификационное свойство настраиваемой модели:

$$A_{iM} \rightarrow A_i; \quad B_{iM} \rightarrow B_i \quad (14)$$

Для проверки работоспособности полученного алгоритма адаптивной идентификации для модели МПО по курсу и крену было проведено моделирование в среде MATLAB Simulink. Система адаптивной идентификации параметров представлена на рис.1 и состоит из 8 функциональных подсистем.

Подсистемы «Модель\_курса\_судна» и «Модель\_крена\_судна» моделируют поведение МПО по курсу и крену, на вход систем подаются значения изменения угла поворота руля и скорости движения МПО соответственно. Представлено 5 блоков идентификации параметров настраиваемой модели  $A_{iM}$  и  $B_{iM}$ , алгоритм настройки получен из (13). Внутреннее устройство блока идентификации параметра  $A_{1M}$  представлено на рис. 2. В блоке «Адаптация модели» происходит настройка модели и сравнение расхождения выходного сигнала реального объекта и настраиваемой модели (9), на основе этой информации происходит адаптивная настройка параметров в блоках идентификации.

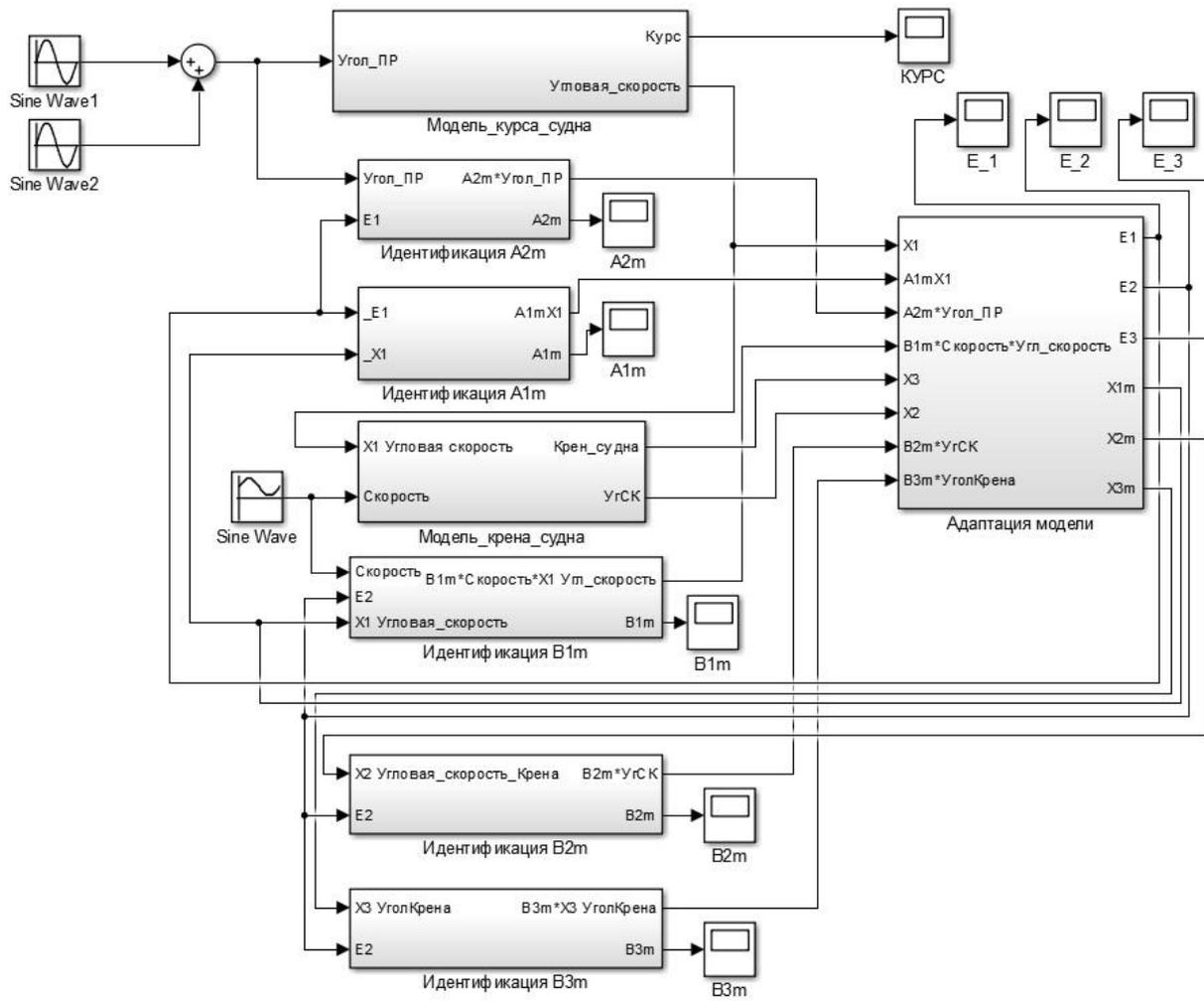


Рис. 1. Модель адаптивной идентификации в среде MATLAB Simulink

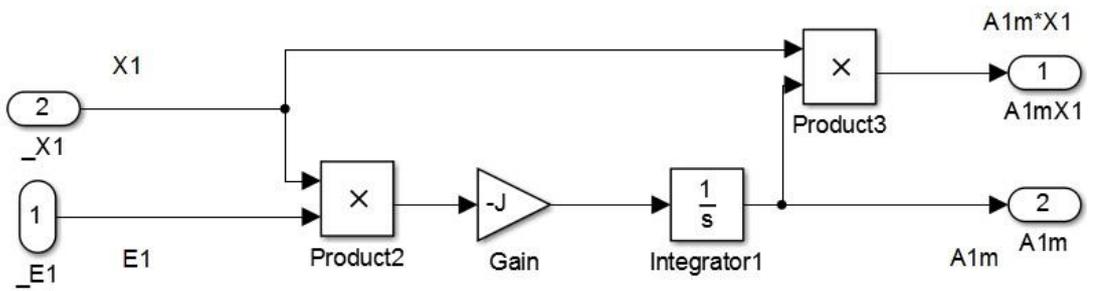


Рис. 2. Подсистема идентификации блока  $A_{1M}$

Процесс идентификации параметра  $A_{1M}$  представлен на рис.3, значение параметра настраиваемой модели  $A_{1M}$  (сплошная линия на рис.3) согласно алгоритму настройки адаптивной нелинейной идентифицирующей модели (13) с течением времени стремится к значению параметра моделируемого объекта  $A_1$  (пунктирная линия на рис.3).

Аналогичный процесс для параметра  $B_{3M}$  представлен на рис.4, значение параметра настраиваемой модели  $B_{3M}$  (сплошная линия на рис.4), значение параметра моделируемого объекта  $B_3$  (пунктирная линия на рис.4). Стоит отметить, что адаптивная идентификация остальных параметров модели:  $A_{2M}, B_{1M}, B_{2M}$  происходит аналогично.

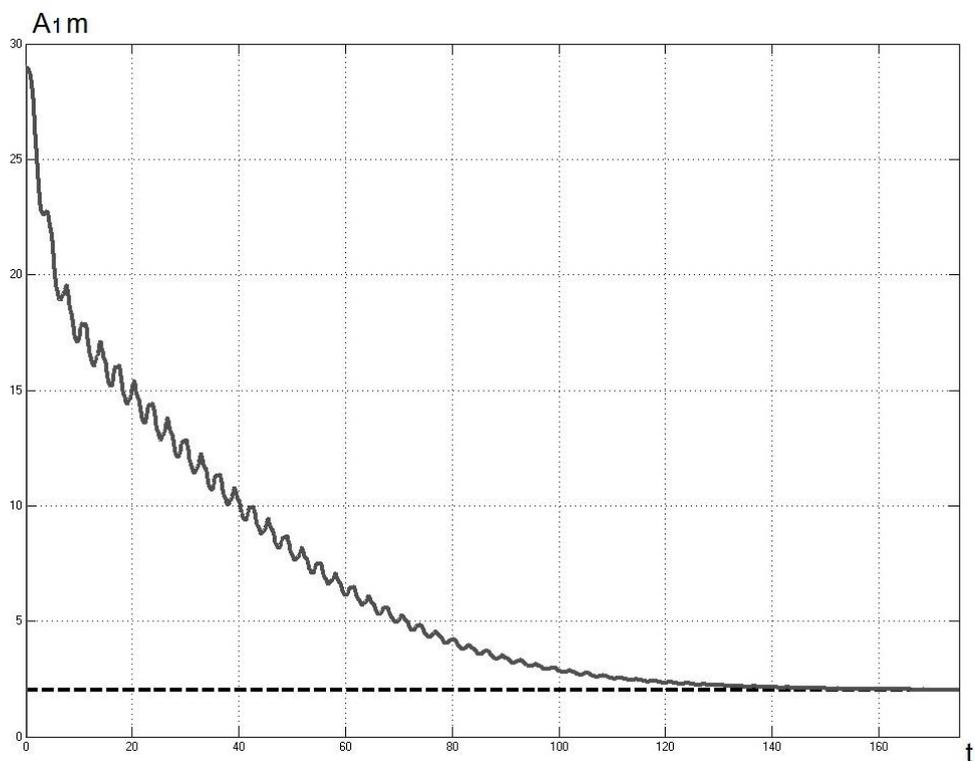


Рис. 3. Идентификация параметра  $A_{1M}$

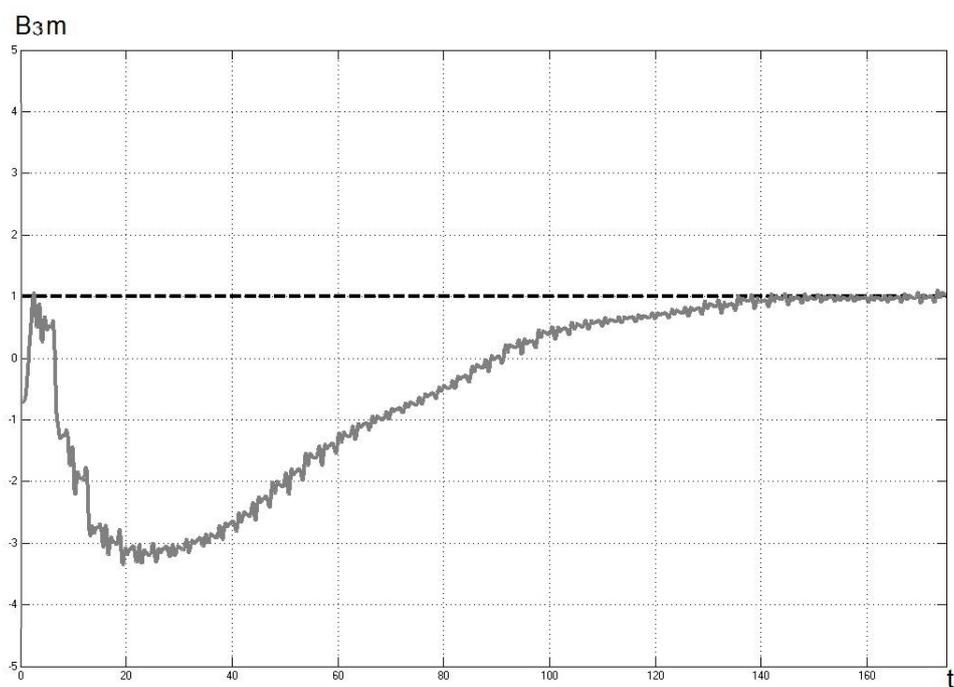


Рис. 4. Идентификация параметра  $B_{3M}$

Результаты моделирования подтвердили, что настраиваемые параметры  $A_{iM}$  и  $B_{iM}$ , согласно идентификационному свойству модели стремятся к аналогичным коэффициентам, заданным для объекта управления.

Адаптивная идентификация позволяет создавать системы управления МПО, учитывающие изменения реальных параметров объекта управления в процессе его эксплуатации. Применение адаптивной идентификации параметров МПО, и последующая передача параметров в алгоритм управления в свою очередь повысит качество управления.

#### Список литературы

1. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами Л.: Судостроение, 1988.
2. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1990. – 296 с.
3. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами/ И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков. – СПб.:Наука, 2000. – 549 с.

УДК 51-72, 74

**Попов Игорь Павлович**

*научный консультант, Центр высоких технологий, г. Курган,  
e-mail: cht.045@mail.ru*

## СУПЕРПОЗИЦИЯ СОСТОЯНИЙ КАК ПРИНЦИП МОДЕЛИРОВАНИЯ

### Введение

Пусть состояние объекта оценивается величиной  $\xi$ , при этом  $\xi \in [\xi_a, \xi_z] \subset \mathbb{C}$ . Представление  $\xi$  в виде суперпозиции граничных состояний  $\xi_a$  и  $\xi_z$  имеет вид:

$$\xi = \varphi_a \xi_a + \varphi_z \xi_z, \quad (1)$$

где  $\varphi_a$  и  $\varphi_z$  – функции состояния.

Принцип суперпозиции состояний широко используется в квантовой механике. В соответствии с ним если система может находиться в состоянии, изображаемом волновой функцией  $\psi_1$ , и в состоянии  $\psi_2$ , то может иметь место состояние  $\psi = c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2$ , где комплексные функции  $c_1$  и  $c_2$  определяются из условия нормировки  $\psi$ . При этом в квантовой механике принцип суперпозиции трактуется в более широком смысле, чем (1), поскольку  $\psi_1$  и  $\psi_2$  не обязательно являются граничными состояниями.

В некоторых случаях представление (1) существенно упрощает решение задач.

**Пример 1.** В  $\mathbb{R}^1$  скорость объекта изменяется по закону  $v = p - qt^2$ . При этом  $v_a = v(t_a) = p$ ,  $t_a = 0$ ,  $v_z = v(t_z) = p - qt_z^2$ . Среднее значение скорости (частный случай промежуточного значения) может определяться суперпозицией его граничных состояний:

$$\bar{v} = \varphi_a v_a + \varphi_z v_z = \frac{2}{3} v_a + \frac{1}{3} v_z,$$

которое позволяет при вычислении перемещения объекта заменить отыскание интеграла Римана произведением  $\bar{v}$  на длину интервала интегрирования.

В ряде случаев, особенно когда  $\xi$  может быть определено лишь экспериментально, при его аналитическом описании представление (1) бывает единственно приемлемым.

Актуальность темы может быть подкреплена примером необходимости расчета динамики платформы с сыпучим грузом при совершении линейных колебаний в горизонтальной плоскости [1]. Основная трудность этой задачи состоит в отсутствии даже приблизительных сведений об обобщенном коэффициенте динамического трения, поскольку на его величину существенно влияют перемещения фрагментов груза во всем его объеме, а не только в плоскости соприкосновения с платформой. Представление состояния груза в виде суперпозиции его подвижного и неподвижного состояний позволяет решать эту и подобные задачи.

Дальнейшее рассмотрение ограничивается широко распространенными в практических задачах моделями с взаимоисключающими равновеликими граничными состояниями.

### **Суперпозиция взаимоисключающих равновеликих граничных состояний**

Таковыми состояниями могут быть, в частности,  $\xi_a$  – неподвижность объекта относительно некой системы отсчета, а  $\xi_z$  – его подвижность или  $\xi_a$  – твердость, а  $\xi_z$  – пластичность объекта и т.п. При этом

$$|\xi| = |\xi_a| = |\xi_z| \tag{2}$$

Из этого следует, что

$$\varphi_a + \varphi_z = 1$$

и промежуточное состояние можно представить в виде:

$$\xi = \varphi_a \xi_a + (1 - \varphi_a) \xi_z = (1 - \varphi_z) \xi_a + \varphi_z \xi_z.$$

**Пример 2.** Инертный объект расположен на платформе, совершающей линейные колебания в горизонтальной плоскости относительно системы отсчета. Состоянию  $\xi_a$  соответствует максимальная частота колебаний  $\omega_a$ , при которой груз остается неподвижным относительно платформы за счет статической силы трения. При этом он совершает колебания относительно системы отсчета с теми же частотой и амплитудой, что и платформа. Состоянию  $\xi_z$  соответствует минимальная частота  $\omega_z$ , при которой груз остается неподвижным относительно системы отсчета, благодаря инерции. При этом он совершает колебания относительно платформы с теми же частотой и амплитудой. Очевидно, что  $\omega_a < \omega_z$ .

При частоте  $\omega_a < \omega < \omega_z$   $\varphi_a$ -я часть груза условно может считаться неподвижной относительно платформы,  $\varphi_z$ -я часть – подвижной.

В приведенном примере функции состояния связаны с частотой колебаний, которая является *переменной состояния*. Переменными состояния могут быть другие величины – время, скорость, температура, процентное содержание углерода или легирующих и т.д.

### Функции состояния

Пусть  $x$  – переменная состояния,  $x \in [x_a, x_z] \subset \mathbb{R}$ . Переменная состояния является аргументом функции состояния.

Функции состояния могут быть линейными:

$$\begin{aligned} \varphi_a(x) &= 1 - p(x - x_a), \quad p \in \mathbb{R}, \\ \varphi_z(x) &= p(x - x_a), \\ p(x_z - x_a) &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Во многих случаях функции состояния являются нелинейными, при этом чаще всего их аналитическое изображение неизвестно.

Для рассматриваемых моделей с взаимоисключающими равновеликими граничными состояниями функции состояния, как правило, являются непрерывными и монотонными на интервале  $[x_a, x_z]$ . При этом  $\varphi_a$  изменяется от 1 до 0, а  $\varphi_z$  – от 0 до 1. При этих условиях функции состояния почти в любом случае являются аналитическими на интервале  $[x_a, x_z]$  и могут быть представлены в виде разложений в ряды, например, Тейлора:

$$\varphi_a(x) = \varphi_a(x_w) + \varphi'_a(x_w)(x - x_w) + \frac{\varphi''_a(x_w)}{2!}(x - x_w)^2 + \dots + \frac{\varphi_a^{(n)}(x_w)}{n!}(x - x_w)^n \quad (4)$$

при условии пренебрежимой малости остаточного члена. Здесь  $x_w \in [x_a, x_z]$ . В пользу ряда Тейлора говорит, например, то, что (3) является его частным случаем при  $n = 1$ .

Величины

$$\varphi_a(x_w), \varphi'_a(x_w), \varphi''_a(x_w), \dots, \varphi_a^{(n)}(x_w) \quad (5)$$

можно рассматривать как *параметры функции состояния*. Для их определения необходимо найти, например, экспериментально помимо  $\varphi_a(x_w)$  еще  $n$  конкретных значений функции состояния  $\varphi_a(x_1), \varphi_a(x_2), \dots, \varphi_a(x_n)$  и составить в соответствии с (4) систему из  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными.

Поскольку граничные значения функции состояния известны, границы интервала  $[x_a, x_z]$  без труда можно определить в соответствии с (4).

Если, в частности,  $\xi_a$  – неподвижность, а  $\xi_z$  – подвижность объекта (как в примере 2), то  $\varphi_a(x)$  можно рассматривать как *функцию неподвижности*, а  $\varphi_z(x)$  – как *функцию подвижности*. При этом (5) являются *параметрами функций* подвижности и неподвижности.

Если  $\xi_a$  – твердость, а  $\xi_z$  – пластичность объекта, то  $\varphi_a(x)$  можно рассматривать как *функцию твердости*, а  $\varphi_z(x)$  – как *функцию пластичности*. При этом переменной состояния может быть процентное содержание углерода или легирующих.

Аналогичным образом могут определяться функции для других состояний.

**Пример 3.** Для системы, описанной в примере 2, экспериментально получены следующие данные:  $n_w = 8 \text{ с}^{-1}$  (рабочий режим) ( $n = \omega/2\pi$ ),  $\varphi_a(n_w) = 0,320$ ;  $n_1 = 3 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi_a(n_1) = 0,822$ ;  $n_2 = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi_a(n_2) = 0,579$ ;  $n_3 = 12 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi_a(n_3) = 0,122$ . Система уравнений для этих данных в соответствии с (4) имеет вид:

$$\begin{cases} 0,822 = 0,320 + \varphi'_a(8)(3-8) + \frac{\varphi''_a(8)}{2!}(3-8)^2 + \frac{\varphi'''_a(8)}{3!}(3-8)^3 \\ 0,579 = 0,320 + \varphi'_a(8)(5-8) + \frac{\varphi''_a(8)}{2!}(5-8)^2 + \frac{\varphi'''_a(8)}{3!}(5-8)^3 \\ 0,122 = 0,320 + \varphi'_a(8)(12-8) + \frac{\varphi''_a(8)}{2!}(12-8)^2 + \frac{\varphi'''_a(8)}{3!}(12-8)^3 \end{cases} .$$

Решение системы:

$$\varphi'_a(8) = -6,825 \cdot 10^{-2}, \quad \frac{\varphi''_a(8)}{2!} = 5,456 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{\varphi'''_a(8)}{3!} = -1,977 \cdot 10^{-4} .$$

Таким образом, функция неподвижности (4) имеет вид:

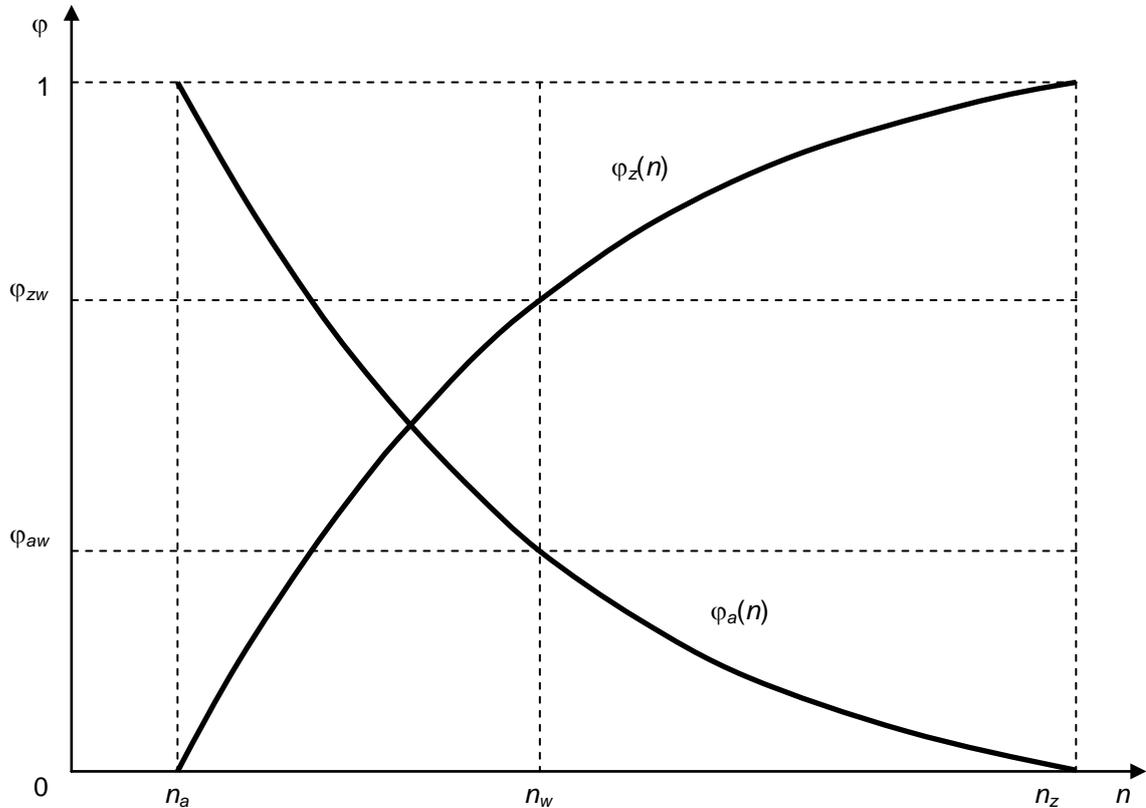
$$\varphi_a(n) = 0,320 - 6,825 \cdot 10^{-2}(n-8) + 5,456 \cdot 10^{-3}(n-8)^2 - 1,977 \cdot 10^{-4}(n-8)^3 .$$

Функция подвижности, соответственно:

$$\varphi_z(n) = 0,680 + 6,825 \cdot 10^{-2}(n-8) - 5,456 \cdot 10^{-3}(n-8)^2 + 1,977 \cdot 10^{-4}(n-8)^3 .$$

По известным граничным значениям функций состояния (0 и 1) определяются граничные значения переменной состояния:  $n_a = 1,8 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_z = 17,2 \text{ с}^{-1}$ .

На рисунке изображены функции состояния для рассматриваемого примера.



**Рис. 1.** Функции состояния

Состояние груза на рабочей частоте  $n_w = 8 \text{ с}^{-1}$  определяется суперпозицией его граничных состояний

$$\xi = \varphi_a(n_w)\xi_a + \varphi_z(n_w)\xi_z = 0,32\xi_a + 0,68\xi_z$$

Для определения инерционных и диссипативных нагрузок привода платформы суперпозиция граничных состояний может быть распространена на массу груза  $m$ . Для этого последнее выражение, имея в виду (2), следует разделить на  $|\xi|$  и умножить на  $m$ .

$$m = \varphi_a(n_w)m + \varphi_z(n_w)m = 0,32m + 0,68m$$

Это можно условно интерпретировать таким образом, что груз массой  $0,32m$  совершает колебания вместе с платформой, внося вклад в инерционную нагрузку, а груз массой  $0,68m$  за счет подвижности относительно платформы создает силу трения и соответствующую диссипативную нагрузку.

Этот способ может использоваться для объектов с другими параметрами и состояниями

### Пример алгоритма экспериментального определения значений функций состояния

Платформу в примерах 2 и 3 можно заменить на две платформы с общим приводным валом, совершающие колебания с одинаковыми фазами или в противофазах. При отсутствии груза измеряется мощность  $P$ , развиваемая приводом на частоте  $n_c$ . Она состоит из двух неизвестных частей –  $P_{11}$  и  $P_{21}$ , обусловленных соответственно инерционными и диссипативными нагрузками.

После этого от общего вала платформам сообщают колебания той же частоты  $n_c$ , сдвинутые друг относительно друга на четверть периода колебаний. В этом случае платформы обмениваются кинетической энергией между собой, а не с приводом, для которого в этой связи часть мощности, обусловленная инерционной нагрузкой, равна нулю [2–10]. Измеренная мощность привода равна  $P_{21}$ . По измеренным  $P$  и  $P_{21}$  определяется  $P_{11}$ .

На платформы размещается груз, и на той же частоте  $n_c$  выполняются аналогичные измерения, в результате которых становятся известными величины  $P_{12}$  и  $P_{22}$ .

Искомая часть массы груза  $\varphi_a(n_c)t$ , вносящая вклад в инерционную нагрузку, определяется разностью  $P_{12} - P_{11}$ .

Часть массы груза  $\varphi_z(n_c)t$ , вносящая вклад в диссипативную нагрузку, определяется как

$$\varphi_z(n_c) = t - \varphi_a(n_c)t$$

По части диссипативной мощности  $P_{22} - P_{21}$  и  $\varphi_z(n_c)t$  можно определить обобщенный коэффициент динамического трения системы груз-платформа, в том числе, для сыпучего груза.

### Заключение

Не всегда имеется возможность определить граничные состояния исследуемого объекта  $\xi_a$  и  $\xi_z$ . В этом случае вместо (1) можно использовать его обобщение:

$$\xi = \varphi_b(x)\xi_b + \varphi_y(x)\xi_y, \quad \xi \in [\xi_b, \xi_y] \subset [\xi_a, \xi_z].$$

Таким образом, представление состояния объекта в виде суперпозиции его известных состояний является удовлетворительной моделью для ряда задач.

### Список литературы

1. Попов, И.П. Редукция мощности привода решетных сортировальных машин / И.П. Попов, В.Г. Чумаков, А.Д. Терентьев // Научно-технические ведомости Санкт-

Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 2(219). – С. 175–181.

2. Popov, I.P. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements / I.P. Popov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 76. – Iss. 4. – P. 393–395.

3. Попов, И.П. Колебательные системы, состоящие только из инертных или только упругих элементов, и возникновение в них свободных гармонических колебаний / И.П. Попов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 1(21). – С. 95–103.

4. Попов, И.П. Колебательные системы с однородными элементами / И.П. Попов // Инженерная физика. – 2013. – № 3. – С. 52–56.

5. Попов, И.П. Свободные механические гармонические колебания со смещенными фазами / И.П. Попов, Е.О. Шамарин // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2013. – № 2(29). – С. 39–48.

6. Попов, И.П. Механические колебательные системы, состоящие только из однородных элементов, и возникновение в них свободных гармонических колебаний / И.П. Попов // Омский научный вестник. Приборы, машины и технологии. – 2012. – № 3(113). – С. 177–179.

7. Попов, И.П. Свободные механические гармонические колебания, обусловленные преобразованием кинетической энергии в кинетическую / И.П. Попов // Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – Вып. 6. – № 3(30). – С. 76, 77.

8. Попов, И.П. Свободные механические гармонические колебания в системах с кривошипно-кулисными механизмами / И.П. Попов // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. – 2012. – Вып. 7. – №2(24). – С. 14–16.

9. Попов, И.П. О самонейтрализации реакции системы, состоящей из упругих элементов, на гармонические воздействия / И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева // Зауральский научный вестник. – 2012. – № 2. – С. 39–41.

10. Попов, И.П. Самонейтрализация реакции системы из трех массивных частей на внешние периодические воздействия / И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева // Высокие технологии в машиностроении: Материалы Международной научно-технической конференции. Курган. КГУ. – 2012. – С. 209–211.

УДК 681.7.068

***Седов Виктор Александрович,***

*к. ф.-м. н., доцент, зав. кафедры ТОЭ, МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
e-mail: sedov@msun.ru*

## **МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ ИЗГИБОМ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА**

Для измерения физических воздействий, распределенных на некоторой области, перспективно использовать распределенные волоконно-оптические информационно-измерительные системы (ВОИИС) на базе волоконно-оптических измерительных сетей (ВОИС) [1, 2]. Такие ВОИС состоят из набора определенным образом уложенных распределенных либо квазираспределенных волоконно-оптических измерительных линий (ВО-

ИЛ). Принцип действия ВОИЛ основан на связи изменения оптических параметров среды, индуцированного внешним измеряемым физическим воздействием, с параметрами проходящего по волоконным световодам (ВС) оптического излучения. По типу изменяемых характеристик ВОИЛ основными видами модуляции являются фазовая, спектральная, поляризационная и амплитудная модуляции света. Одним из перспективных видов амплитудных датчиков для ВОИС являются амплитудные волоконно-оптические датчики на основе нарушения полного внутреннего отражения, в котором изменение пропускания оптического излучения ВС происходит при изменении его геометрии. Широкие возможности по созданию на их основе квазираспределенных ВОИЛ для ВОИС открывают такие их свойства, как неразрывность конструкции чувствительного элемента и простота управления его геометрией.

В работе исследуются физические принципы модуляции светопропускания за счет изменения геометрии волокна одиночным изгибом с малым радиусом кривизны, а также при воздействии серии изгибов волокна на периодической решетке и при его изгибании на упругой подложке. Исследованные механизмы модуляции ВС и полученные математические выражения образуют теоретическую базу для создания деформационно-чувствительных элементов для ВОИИС.

### **1. Физические принципы модуляции светопропускания ВС изменением радиуса его изгиба**

Исследуем физические принципы модуляции светопропускания за счет изменения геометрии волокна изгибом с малым радиусом кривизны. Для этого рассмотрим воздействие изгиба на волновод с точки зрения лучевой эквивалентности с модификацией ее на основе концепции локальных плоских волн, что обеспечивает наиболее прямой и наглядный способ описания распространения света в многомодовых (ММ) ВС. Модовая эквивалентность позволяет получить те же результаты, что и классическая геометрическая оптика, однако она требует выполнения дополнительных алгебраических преобразований, при этом изменение характеристик ВС (например, его изгиб) приводит к различному отклику в каждой моде излучения, что дополнительно осложняет расчет. Как показано на рис. 1, ВС, возбуждаемый диффузным источником  $S$ , имеет прямолинейный участок, переходящий к изогнутому с радиусом  $R$ . Диффузный источник возбуждает в сечении ВС все направляемые и рефрагирующие лучи. Если длина прямолинейного участка волновода достаточно велика, то имеет место пространственно установившийся режим распространения света и на изгибе следует рассматривать только те лучи, которые на прямолинейном участке являлись направляемыми, так как любой луч, являющийся на прямолинейном участке вытекающим, на изогнутом участке имеет гораздо большее затухание, и им можно пренебречь. Вследствие азимутальной симметрии каждый луч в ВС следует по изогнутой синусоподобной траек-

тории и для сердцевин с градиентным профилем показателя преломления имеет характерный вид, показанный на рис. 1. Для градиентного профиля  $n(r)$  уменьшается с удалением от оси ВС, поэтому для каждого луча в симметричном волноводе на расстояниях  $R + r_k$  и  $R - r_k$  угол  $\Theta_\varphi(r)$ , образованный между касательной к траектории луча и осью волновода, принимает значение равное нулю. Такое расстояние  $r_k$  является точкой поворота луча, а геометрическое место точек поворота для всех лучей волновода образует каустику точек поворота.

Так как затухание мощности оптического излучения – волновое явление, которое нельзя описать с помощью геометрической оптики, необходимо ввести допущение, что потери мощности на излучение имеют место только в точках отражения или поворота. Тогда скорость затухания мощности будет зависеть только от расстояния между точками отражения или поворота вдоль ВС или плотности их расположения, которые определяются методами геометрической оптики. Таким образом, при вычислении потерь на излучение можно использовать геометрическую оптику для определения траектории вытекающего луча внутри сердцевин изогнутого ВС и соответствующий коэффициент прохождения мощности при определении потерь в точках поворота или отражения. Полные потери на излучение будут равны сумме потерь вдоль всех траекторий вытекающих лучей. Для нахождения мощности направляемого луча на изгибе в сечении  $\varphi$  имеем:

$$P_l(\varphi) = P_0 e^{-\gamma\varphi}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – мощность направляемого луча в прямолинейном волноводе,  $\gamma$  – коэффициент затухания мощности.

Определим  $\varphi_p$  как угловое расстояние между последовательными точками поворотов или отражений, на которых теряется мощность. Тогда коэффициент затухания мощности  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{T}{\varphi_p}, \quad (2)$$

где  $T$  – коэффициент прохождения мощности. Этот коэффициент описывает потери, связанные с выходом части мощности из сердцевин в оболочку при отражении рефрагирующего луча на каустике точек поворота, и наряду с  $\varphi_p$  зависит от профиля показателя преломления ВС.

Для нахождения полной лучевой мощности в сечении  $\varphi$  изгиба необходимо выражение (1) проинтегрировать по всем лучевым траекториям и поперечному сечению сердцевин:

$$P_s(\varphi, R) = P_0 \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\gamma\varphi) d\theta, \quad (3)$$

где  $\Theta_c(r)$  – локальный критический угол скольжения, отнесенный к центру кривизны, определяет максимальный угол между направлением луча и осью волновода, при котором возможно распространение направляемых лучей. Для градиентных волноводов локальный критический угол сколь-

жения определяется как:

$$\theta_c(r) = \arcsin(n_1/n(r)), \quad (4)$$

Рассмотрим расчет нахождения полной лучевой мощности для ВС с градиентным профилем показателя преломления. В этом случае на изгибе профиль показателя преломления сердцевины относительно оси  $C$  определяется выражением:

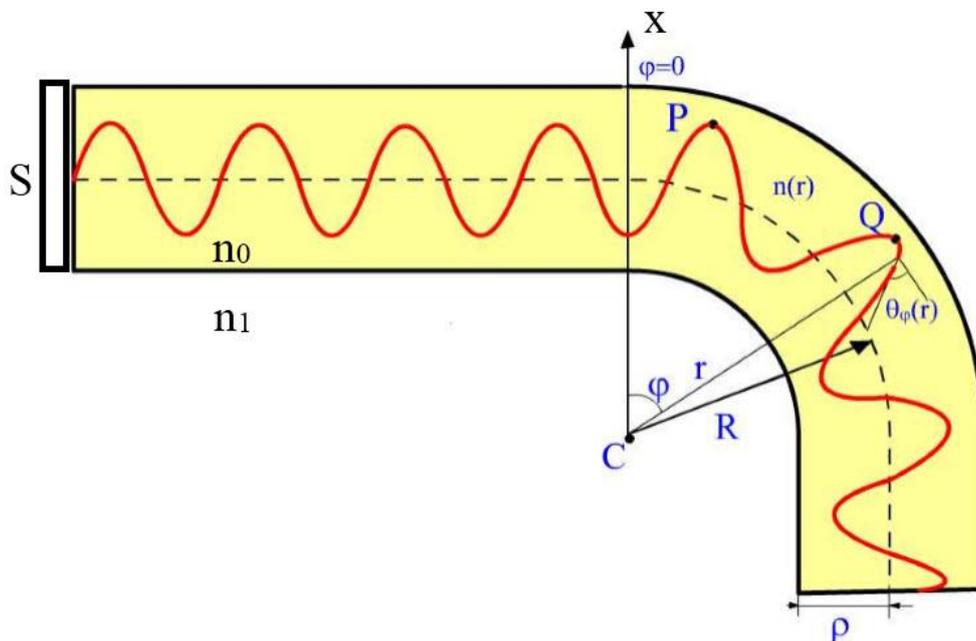
$$n(r) = \sqrt{n_0^2 \left( 1 - 2\Delta \frac{(r-R)^2}{\rho^2} \right)}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – радиус сердцевины ВС,  $\Delta = \left( 1 - \frac{n_1^2}{n_0^2} \right) / 2$ , константа, характеризующая относительную высоту профиля показателя преломления.

Угловое расстояние между последовательными наружными точками поворота (угол между прямыми  $CP$  и  $CQ$  на рис. 1):

$$\varphi_p = \frac{2\pi\rho \cdot l}{R\sqrt{n_0^2 - n_1^2}}, \quad (6)$$

где  $l$  – инвариант лучевой траектории.



**Рис. 1.** Лучевая траектория в изогнутом ВС с градиентным профилем показателя преломления

( $R$  – радиус изгиба ВС,  $\varphi$  – угол изгиба ВС,  $\rho$  – радиус сердцевины ВС,  $\theta$  – угол между касательной к траектории и азимутальным направлением)

Инвариант лучевой траектории  $l$  характеризует направление луча в любой точке поперечного сечения сердцевины ВС и постоянен вдоль пути распространения луча. Для градиентного ВС введение лучевого инварианта существенно упрощает описание лучевой траектории, позволяя классифицировать лучи по значению их инварианта. Инвариант направляемых лучей в ВС лежит в диапазоне значений  $n_1 < l < n_0$ , где  $n_0$  является максимальным значением  $n(r)$ . Значение инварианта лучевой траектории для градиентного ВС вычисляется по формуле:

$$l = \frac{rn(r)}{R + \rho}, \quad (7)$$

на рис. 2(а) представлены графики зависимости  $l(r)$  для четырех разных радиусов изгиба ВС. Из графиков видно, что при уменьшении радиуса кривизны ВС каустика точек поворота сужается и смещается к наружной границе сердцевины ВС, что говорит об уменьшении пропускающей способности ВС на изгибе.

Формула, выражающая коэффициент затухания мощности  $T$  для ВС с градиентным профилем имеет вид:

$$T = \exp\left(-\frac{2/3 \cdot k(R + \rho)(l^2/n_1^2 - 1)^{3/2}}{1 - \rho \cdot l^2 / (R + \rho)n_0^2\theta_c(r)}\right), \quad (8)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны светового излучения.

Графики  $T(R)$ , проиллюстрированные на рис. 2(б), подтверждают вывод о затухании оптической мощности на каустике точек разворота луча, и иллюстрируют смещение каустики в сторону, противоположную изгибу.

Таким образом, подставляя выражения (6) и (8) в (3), имеем выражение для полной лучевой мощности в сечении  $\varphi$  изгиба:

$$P(\varphi, R) = P_0 \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp\left(-\frac{R\sqrt{n_0^2 - n_1^2}}{2\pi\rho \cdot l} \exp\left(-\frac{2/3 \cdot k(R + \rho)(l^2/n_1^2 - 1)^{3/2}}{1 - \rho \cdot l^2 / (R + \rho)n_0^2\theta_c(r)}\right)\right) \varphi d\theta, \quad (9)$$

График зависимости полной лучевой мощности на выходе ВС  $P(R)$ , рассчитанный для ВС с  $\rho = 25$ мкм,  $n_1 = 1.453$ ,  $n_0 = 1.476$  для  $\varphi = 180$  град. представлен на рис. 3.

График на рис. 4 иллюстрирует семейство кривых  $P(\varphi)$  для заданных радиусов кривизны.

Полученные графики хорошо коррелируют с результатами теоретических выкладок в модовом приближении и экспериментальных исследований других авторов, проводимых с изгибаемым ВС.

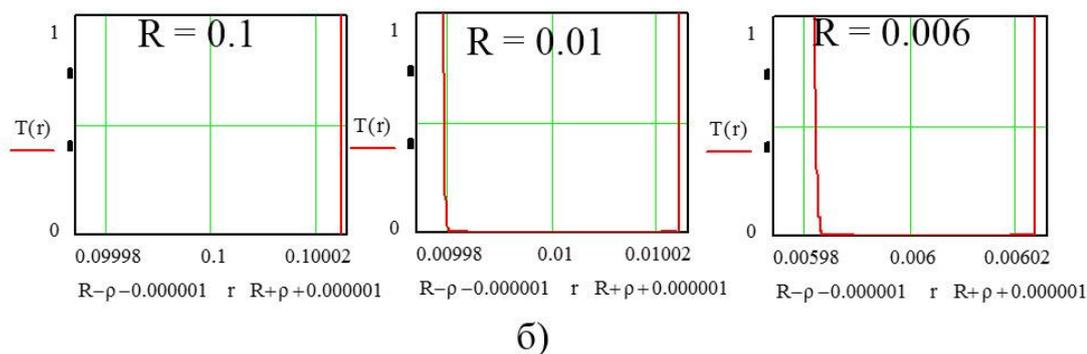
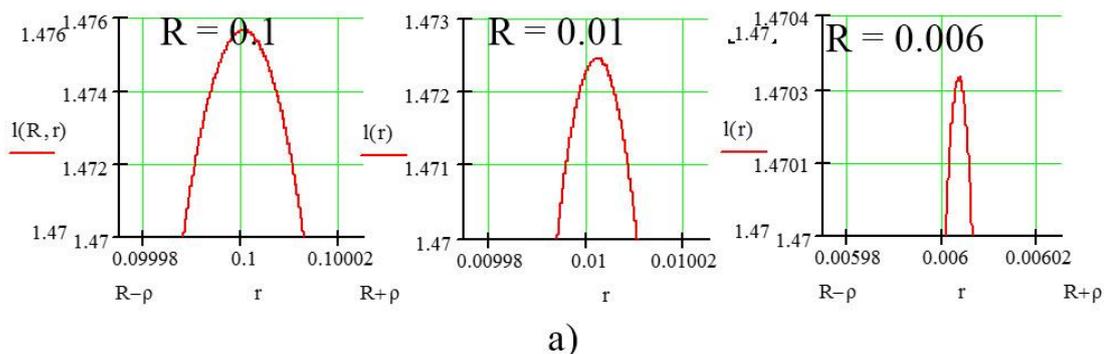


Рис. 2. Инвариант лучевой траектории для градиентного ВС (а) и коэффициент прохождения мощности (б) при разных радиусах изгиба ВС

## 2. Модуляция светопропускания волоконного световода серией изгибов при его сжатии между профилированными пластинами

Для увеличения амплитудной чувствительности деформируемых ВС с практической точки зрения перспективно применение дополнительных механических элементов, усиливающих эффект деформации.

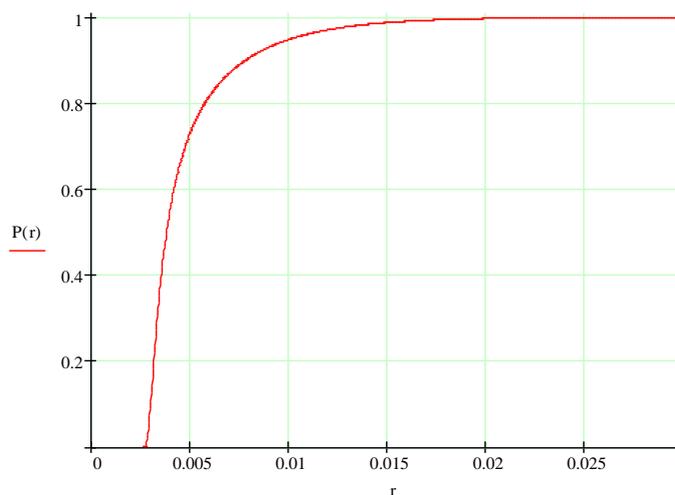
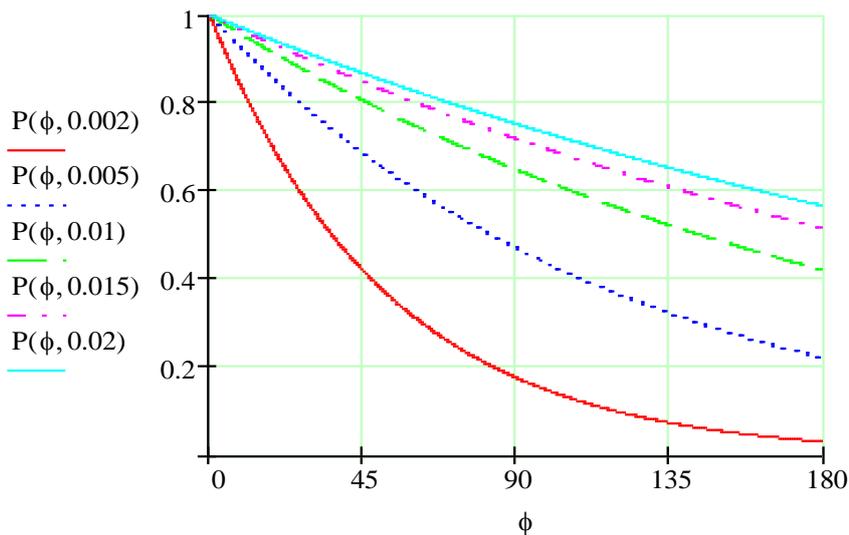
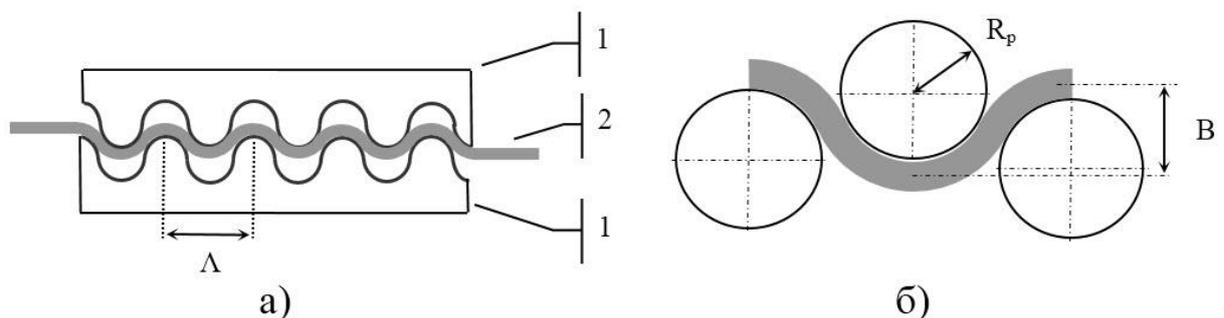


Рис. 3. Полная лучевая мощность  $P(R)$  на выходе ВС, изгибаемого при  $\varphi = const$



**Рис. 4.** Полная лучевая мощность  $P(\varphi)$  на выходе ВС, изгибаемого при  $R = const$

При сжатии ВС между двумя профилированными особым образом пластинами (ПП) (как показано на рис. 5) возникает заданное количество микроизгибов, влияющих на выходное значение оптического сигнала гораздо сильнее, чем единый макроскопический изгиб. Эффект накопления потерь в такой структуре связан с тем, что каждый из изгибов ВС является локальным отражателем, эффективность которого зависит от величины изгиба волокна. Таким образом, для расчета воздействия ПП на ВС необходимо выразить мощность оптического излучения на выходе ВС от внешней силы, а для теоретического обоснования квазираспределенных деформационных волоконно-оптических измерительных линий (ВОИЛ) необходимо выразить мощность оптического излучения на выходе ВС в зависимости от воздействия нескольких профилированных пластин на структуру ВС, являющегося основой ВОИЛ.



**Рис. 5.** Изгибание ВС на профилированных пластинах (а) и стрела прогиба  $B$  изгибаемого ВС (б)

(1 - профилированные пластины; 2 - ВС, изгибаемый на профилированных пластинах)

Как показано на рис. 5(а), при воздействии ПП ВС принимает вид синусоиды с восприятием изгибающего усилия в точках его опоры на решетке. При этом модуляция амплитуды сигнала при сдавливании ВС на

профилированных пластинах с периодической гребенчатой структурой происходит как за счет изменения радиуса изгиба, так и за счет изменения угла изгиба ВС на ПП. При сжатии ВС ПП на начальной стадии воздействия затухание амплитуды происходит за счет изменения радиуса изгиба при малых значениях угла изгиба, а при значительном сжатии ПП происходит увеличение угла изгиба на неизменном радиусе. Следовательно, возникает задача определения радиуса кривизны изогнутого ВС и его угла изгиба на этом радиусе в зависимости от его упругих свойств, внешнего усилия, приложенного между ПП и периода микроизгибов.

Как следует из ранее проведенных исследований, для полной лучевой мощности в сечении  $\varphi$  изгибаемого градиентного ВС в лучевом приближении справедлива формула:

$$P(\varphi, R) = P_0 \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp\left(-\frac{R\sqrt{n_0^2 - n_1^2}}{2\pi\rho \cdot l} \exp\left(-\frac{2/3 \cdot k(R+\rho)(l^2/n_1^2 - 1)^{3/2}}{1 - \rho \cdot l^2 / (R+\rho)n_0^2\theta_c(r)}\right)\varphi\right) d\theta, \quad (10)$$

где  $P_0$  – мощность направляемого луча в прямолинейном волноводе,  $R$  – радиус изгиба ВС,  $\varphi$  – угол изгиба ВС,  $\rho$  – радиус сердцевин ВС,  $\theta_c(r)$  – локальный критический угол скольжения, отнесенный к центру кривизны,  $l$  – инвариант лучевой траектории,  $n_0$  и  $n_1$  – показатели преломления сердцевин и оболочки ВС соответственно.

Согласно формуле дифференциальной геометрии, радиус кривизны любой кривой в явном виде в любой точке декартовой плоскости может быть выражен как:

$$\frac{1}{R} = \left| \frac{y''(x)}{(1 + y'^2(x))^{3/2}} \right|, \quad (11)$$

где  $y(x)$  определяется уравнением кривой в явном виде относительно  $x$ .

Для выражения радиуса кривизны ВС, изгибаемого на ПП, через его геометрические параметры, запишем обобщенное выражение синусоиды в декартовых координатах, т. к. ВС при периодических изгибах принимает форму, близкую к синусоидальной:

$$y(x) = A \sin(\omega x + \varphi), \quad (12)$$

Для упрощения исключим из расчета начальную фазу  $\varphi$  и выразим амплитуду и циклическую частоту через параметры ПП. Стрела прогиба  $B$  ВС (рис. 5(б)), будет описываться формулой:

$$y(x) = B \sin(\Lambda x), \quad (13)$$

где  $\Lambda$  – период ПП,  $B$  – стрела прогиба ВС.

Отсюда, радиус кривизны ВС, выраженный через период синусоиды и ее амплитуду, пропорционален квадрату периода микроизгибов  $\Lambda$  и обратно пропорционален стреле прогиба волокна  $B$ , устойчиво возвращающей ВС в исходное состояние:

$$R = \frac{\Lambda^2}{\pi \cdot B}, \quad (14)$$

Воспользовавшись известным выражением для нахождения стрелы

прогиба, можно записать:

$$B = \frac{F\Lambda^3}{48EI}, \quad (15)$$

где  $I = \frac{\pi r^4}{4}$  - момент инерции кругового поперечного сечения ВС радиуса  $r$ ,  
 $E$  – модуль Юнга.

Выражая величину стрелы прогиба через силу из (15), получим

$$B = \frac{4}{3} \cdot \frac{F\Lambda^3}{\pi \cdot d_e^4 EN}, \quad (16)$$

где  $N$  – число изгибов ВС,  $d_e$  – эффективный диаметр ВС, характеризующийся изменением его толщины в результате воздействия на него деформирующей силы.

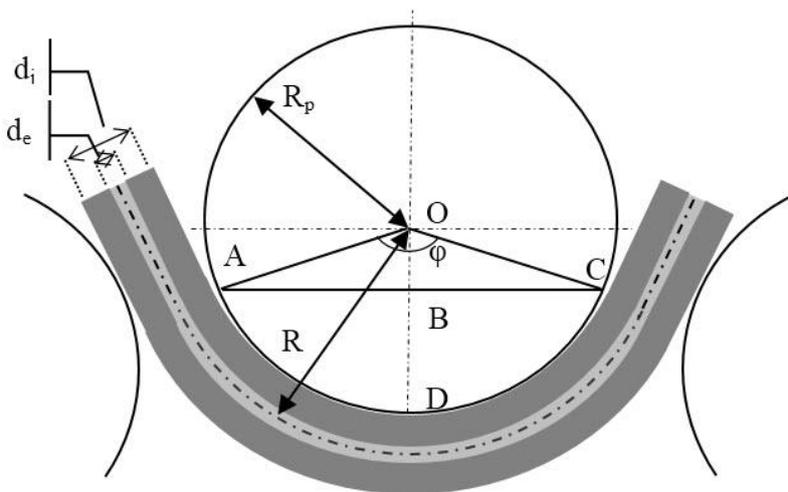
Выразив радиус кривизны ВС, получим

$$R(F) = \frac{3d_e^4 EN}{4F\Lambda}, \quad (17)$$

Для определения величины эффективного диаметра  $d_e$  необходимо внести поправку, связанную с деформацией поперечного сжатия ВС при изгибе. При изменении толщины ВС на величину  $\Delta d$  эффективный диаметр ВС составляет:

$$d_e = d - \Delta d, \quad (18)$$

Величину  $\Delta d$  необходимо определять экспериментально для каждого используемого ВС. Для ВС 50/125 с градиентным профилем показателя преломления без защитной оболочки поправочная величина  $\Delta d$  составляет до 40% от диаметра ВС, указанного в спецификации.



**Рис. 6.** Одиночный изгиб ВС при сжатии его между профилированными пластинами

При переходе от радиуса изгиба ВС  $R$  к радиусу изгибающего элемента  $R_p$  для ВС без защитной оболочки имеем (рис. 6)  $R_p = R - d_e$ , а при

использовании в качестве чувствительного элемента одноволоконного кабеля с защитной оболочкой толщиной  $d_j$  радиус  $R_p$  можно выразить как  $R_p = R - d_j$ . При изгибании на ПП сразу нескольких ВС или кабелей, при условии их одинаковости, необходимо в знаменателе выражения (17) ввести дополнительный коэффициент, равный их количеству.

Угол изгибания  $\varphi(F)$  можно выразить геометрически из рис. 2, так как отрезок OD является радиусом изгибающего элемента ПП  $R$ , а отрезок BD – стрелой прогиба  $B$ , имеем:

$$\varphi(R(F)) = 2 \arccos\left(\frac{R(F) - B}{R(F)}\right), \quad (19)$$

По своему физическому смыслу такой угол изгибания всегда находится в диапазоне  $0 < \varphi(F) < \pi$  (см. рис. 2), при этом максимальный угол изгибания зависит от конструкции изгибающих элементов ПП.

Подставляя в формулу выражение для стрелы прогиба (16), получим:

$$\varphi(R(F)) = 2 \arccos\left(1 - \frac{\Lambda^2}{\pi R^2(F)}\right), \quad (20)$$

Функционально затухание мощности оптического излучения для одиночного луча в зависимости от внешней силы можно выразить как:

$$P(F) = P_0 \exp(-\varphi(F) \cdot \gamma(F)), \quad (21)$$

Полная лучевая мощность на одном изгибе ПП может быть получена при интегрировании затухания мощности по всем лучевым траекториям:

$$P(F) = P_0 \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\varphi(F) \cdot \gamma(F)) d\theta, \quad (22)$$

где  $P_0$  – оптическая мощность на подводящем участке волновода.

Коэффициент затухания мощности  $\lambda$  можно выразить как:

$$\gamma(F) = \frac{\left(\frac{3d_e^4 EN}{4F\Lambda} - d_e\right) \sqrt{n_0^2 - n_1^2}}{2\pi d} \exp\left(-\frac{2/3 \cdot k \left(\frac{3d_e^4 EN}{4F\Lambda} + \rho - d_e\right) (l^2 / n_1^2 - 1)^{3/2}}{1 - \rho \cdot l^2 / \left(\frac{3d_e^4 EN}{4F\Lambda} + \rho - d_e\right) n_0^2 \theta_c(r)}\right), \quad (23)$$

а угол изгибания ВС на элементе ПП радиуса  $R_p$ , полученный в зависимости от внешней силы  $F$ :

$$\varphi(F) = 2 \arccos\left(1 - \frac{\Lambda^2}{2\pi \left(\frac{3d_e^4 EN}{4F\Lambda} - d_e\right)^2}\right), \quad (24)$$

При воздействии на ВС ПП с числом изгибов равным  $N$  мощность оптического излучения подводящего участка ВС для  $n$  изгиба будет равна выходной оптической мощности  $n-1$  изгиба ВС. Таким образом, мощность оптического излучения с ВС при воздействии на него ПП с числом изгибов  $N$  можно рассчитать из:

$$P(F) = P_0 \left[ \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\varphi(F) \cdot \gamma(F)) d\theta \right]^N, \quad (25)$$

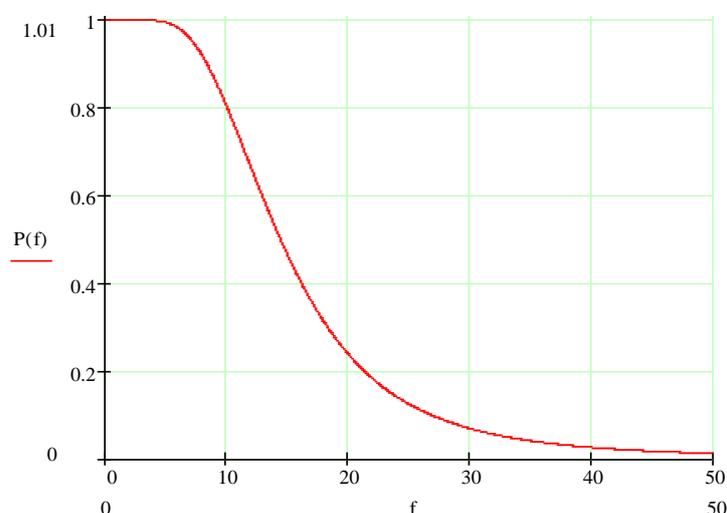
Как сказано выше, эффект накопления потерь в такой структуре связан с тем, что каждый из изгибов ВС является локальным отражателем, эффективность которого зависит от величины изгиба волокна. Известно, что высокая чувствительность ВС к микроизгибам достигается только при взаимодействии мод высших порядков с излучательными модами. При этом период микроизгибов может быть найден из выражения:

$$\Delta_{omn} = \frac{\pi\rho}{\sqrt{\Delta}}, \quad (26)$$

где  $\Delta = \left(1 - \frac{n_1^2}{n_0^2}\right)/2$  – константа.

На рисунке 7 представлен график зависимости выходной оптической мощности от внешней силы  $P(F)$  для ПП с  $L = 5.52$ мм,  $N = 10$  и радиусе изгибающих элементов  $R = 1.5$ мм. Представленный график подтверждает возможность модуляции мощности оптического излучения усилием сжатия профилированных пластин, а, следовательно, возможность создания на базе описанной конструкции датчика давления, использующего ВС не только для подвода/отвода излучения, но и в качестве чувствительного элемента.

Передаточная характеристика такого датчика может меняться в значительных пределах при варьировании параметров ПП, использовании вместо ВС одноволоконных кабелей с защитной оболочкой, сжатии одновременно нескольких ВС или кабелей и т.д.



**Рис 7.** График зависимости выходной оптической мощности  $P(F)$  для ВС при сжатии его между профилированными пластинами

Зависимость мощности оптического излучения для квазираспределенной ВОИЛ с числом точечных датчиков  $M$  на базе преобразователей с профилированными пластинами с числом изгибов  $N$ :

$$P(F) = P_0 \prod_{i=1}^M \left[ \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\varphi(F_i) \cdot \gamma(F_i)) d\theta \right]^N, \quad (27)$$

где  $F_i$  – усилие между профилированными пластинами  $i$  преобразователя,  $i$

$= 1, 2 \dots M$ . В представленном выражении коэффициент затухания мощности  $\lambda(F_i)$  и угол изгиба  $\varphi(F_i)$  вычисляются по формулам (23) и (24) соответственно.

### 3. Модуляция светопропускания ВС путем изменения угла изгиба

В параграфе приводятся физические принципы создания деформационных чувствительных элементов на эффекте изменения светопропускания путем изменения угла изгиба  $\varphi$ . Такой принцип модуляции открывает возможность создания квазираспределенных волоконно-оптических измерительных линий для деформационных волоконно-оптических измерительных сетей, не требующих дополнительных конструкций для создания эффекта накопления потерь и использующих только передающие внешние деформационные воздействия цилиндрические изгибающие поверхности.

Рассмотрим воздействие одиночного цилиндрического элемента радиуса  $R$ , изгибающего ВС диаметром  $d_e$ , лежащий на упругой подстилающей поверхности с коэффициентом упругости  $k$ , под воздействием внешней силы  $F$  (рис. 8). При равновесном состоянии системы действующих сил действие внешней силы  $F$  скомпенсировано силой упругости подстилающей поверхности  $F_{\text{упр}} = -kx$ , где  $x$  – величина прогиба ВС.

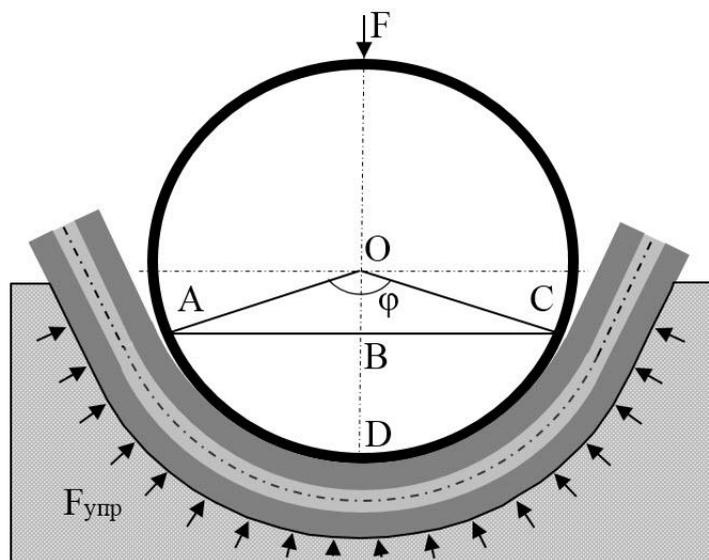


Рис. 8. Изгибание ВС на упругой подстилающей поверхности

Из рисунка геометрически получено:

$$\varphi(F) = 2 \arccos\left(\frac{R-x}{R}\right), \quad (28)$$

Так как  $x = F/k$ , получим:

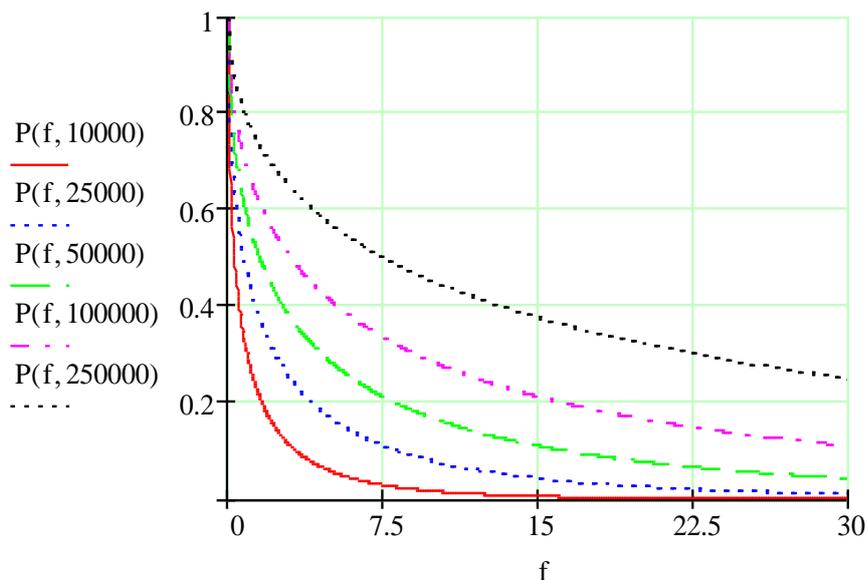
$$\varphi(F) = 2 \arccos \left( \frac{R - \frac{F}{k}}{R} \right), \quad (29)$$

Согласно (1), полная лучевая мощность на выходе ВС на одном изгибе описывается формулой:

$$P(F) = P_0 \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\varphi(F) \cdot \gamma) d\theta, \quad (30)$$

где угол изгиба вычисляется по формуле (29), а коэффициент затухания мощности по формуле (23).

Так как  $R = const$ , то коэффициент затухания мощности не зависит от внешней силы и модуляция амплитуды осуществляется лишь за счет изменения угла изгиба ВС. При этом глубина модуляции зависит от радиуса кривизны изгибающего элемента и максимальна при значениях радиуса, близких к критическому радиусу кривизны ВС. На рисунке 9 представлено семейство кривых, иллюстрирующих зависимость выходной оптической мощности от внешней силы для коэффициентов упругости в диапазоне от 10000Н/м до 250000Н/м, и радиусе изгибающего цилиндрического элемента 0.5мм. Из графика следует, что максимальная чувствительность обеспечивается на начальных участках характеристик, и с ростом величины продавливания  $x$  чувствительность ухудшается. Подстилающая поверхность с большим коэффициентом упругости более благоприятна для создания подобного типа преобразователей, т.к. с ростом  $k$  качественно функция  $P(F)$  становится более гладкой.



**Рис. 9.** График зависимости выходной оптической мощности  $P(F,k)$  для различных коэффициентов упругости  $k$

При воздействии на один ВС нескольких независимых и пространственно разнесенных друг от друга цилиндрических изгибающих элементов, образуется ВОИЛ с результирующей выходной оптической мощностью:

$$P(F) = P_0 \prod_{i=1}^M \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\varphi(F_i) \cdot \gamma) d\theta, \quad (31)$$

где коэффициент затухания мощности  $\lambda$  и угол изгиба  $\varphi(F_i)$  вычисляются по формулам (23) и (29) соответственно.

### Заключение

Приведенные в настоящей работе математические выражения теоретически подтверждают тенденцию монотонного нарушения светопропускания изгибаемого ВС. Так, выражение (9) показывает, что выходная оптическая мощность изгибаемого ВС не зависит от его механических свойств, а зависит только от его оптических характеристик – коэффициентов преломления сердцевины и оболочки, и радиуса сердцевины. Из полученного выражения следует, что модуляция светопропускания на выходе ВС, а значит и ВОИЛ, возможна за счет управления радиусом изгиба  $R$ , углом изгиба  $\varphi$  на поверхности заданного радиуса, либо за счет изменения этих параметров одновременно, что открывает широкие возможности для изготовления чувствительных элементов на описанном эффекте нарушения светопропускания в изгибаемом ВС.

В работе показана зависимость мощности оптического излучения от радиуса изгиба ВС, а также исследован способ улучшения чувствительности к регистрации давления путем создания серии изгибов ВС между ПП. Получена зависимость мощности оптического излучения на выходе квазираспределенной ВОИЛ в зависимости от внешних деформационных воздействий. Полученная зависимость подводит теоретический фундамент под создание деформационных волоконно-оптических измерительных систем на базе квазираспределенных ВОИЛ с микроизгибными преобразователями. Датчики подобного типа могут использоваться в охранных системах, системах мониторинга безопасности технических объектов и сооружений и т.д.

В работе также исследована возможность управления светопропусканием ВС путем управления углом изгиба  $\varphi$  на цилиндрической поверхности заданного радиуса, и создания на основе этого принципа квазираспределенных ВОИЛ что теоретически подтверждено выражением (31) Такие ВОИЛ перспективно использовать для создания распределенных ВОИС, чувствительных к деформации. При использовании взаимоперпендикулярной укладки ВОИС и решетки изгибающих элементов с периодом меньшим, чем пространственная частота укладки ВОИЛ в ВОИС возможно организовать передачу приложенного усилия в областях, не имеющих пересечений ВОИЛ на чувствительные участки с ВОИЛ и таким образом увеличить размерность исследуемых физических полей.

Существенные ограничения к применению на практике такого вида чувствительных поверхностей вносит тот факт, что ВС при давлении на него изгибающей поверхностью испытывает значительную радиальную деформацию, и при использовании подстилающих поверхностей с большим коэффициентом упругости изгибаемые ВС могут выйти из строя. Наиболее перспективное развитие предложенной методики расчета заключается в создании распределенных сигнальных поверхностей на базе ВО-ИЛ с мягкой подстилающей поверхностью для различных применений, например для контроля перемещения в периметре охраняемого объекта.

Разработанные принципы и полученные зависимости легли в основу конструкций чувствительных элементов и квазираспределенных ВОИЛ ВОИС, описанных в работах [3-7].

#### Список литературы

1. Кульчин Ю. Н. Распределённые волоконно-оптические измерительные системы [Текст] / Ю. Н. Кульчин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 272 с.
2. Denisov I. V., Denisova E. V., Rybalchenko N. A., Sedov V. A. Definition of the fiber-optical tomography problem <http://elibrary.ru/item.asp?id=15044721> // В сборнике: International Conference on Physics and Control, PhysCon 2005 Proceedings. 2005. С. 826–829.
3. Denisov I. V., Kirichenko O. V., Sedov V. A., Drozdov R. S., Vorobyev V. V., Artemyev A. V. Organization of fiber-optical temperature measuring system // В сборнике: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics. Sponsors: SPIE Russia Chapter, Russian Federation for Basic Research, Russian Federal Program Integration; editors: Y. N. Kulchin, O. B. Vitrik. Vladivostok, 2002. С. 54–60.
4. Кульчин, Ю. Н. Оптоэлектронная распределенная сигнальная система [Текст] / Ю. Н. Кульчин, И. В. Денисов, В. А. Седов, О. В. Кириченко, Н. А. Рыбальченко // Измерительная техника. – 2005. – Т. 7. – С. 28–32.
5. Денисов, И. В. Волоконно-оптический микроизгибный температурный датчик [Текст] / И. В. Денисов, В. А. Седов, Н. А. Рыбальченко. // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 5. – С. 131–134.
6. Kulchin Y. N., Denisov I. V., Sedov V. A. Fiber-optical microinflection temperature sensor // Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering. 2003. Т. 5. № 1. С. 18.
7. Sedov V. A., Denisov I. V., Rybalchenko N. A. Construction of the fiber-optical temperature measuring system // В сборнике: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III. Сер. «Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III» sponsors: SPIE Russia Chapter, Russian Foundation for Basic Research. Harbin, 2007. С. 65954E.

***Седов Виктор Александрович,***

*к. ф.-м. н., доцент, зав. кафедры ТОЭ, МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
e-mail: sedov@msun.ru,*

***Седова Нелли Алексеевна,***

*к.т.н., доцент, доцент кафедры АИС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
e-mail: nellyfish81@mail.ru*

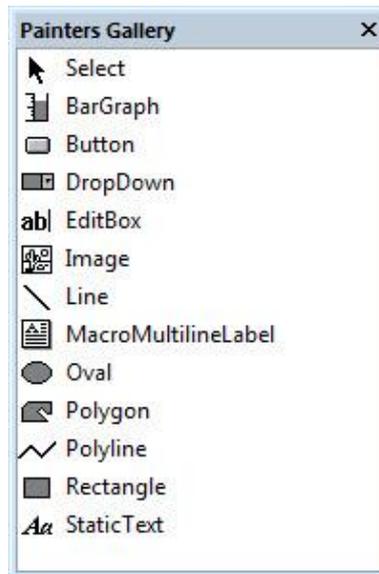
## **СОЗДАНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ВЕБ-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ПРОГРАММ НА ПЛК В РЕДАКТОРЕ WEBVISIT**

При создании систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) зачастую важно иметь возможность визуального контроля и ситуационного вмешательства в процесс [1-4]. В настоящей работе описывается процесс создания графического веб-интерфейса управления (Human machine interface – HMI – интерфейс человек-машина) и приводится простой пример создания интерфейса в редакторе WebVisit компании Phoenix Contact. Приведенный пример программы ПЛК разрабатывался в программе PC WorX 6.30 для Inline контроллера ILC131 в составе стартового комплекта ILC 131 Starterkit.

Редактор WebVisit входит в комплект программ AutomationWORX Software Suit компании Phoenix Contact и предназначен для разработки HMI для программ ПЛК. Редактор WebVisit основан на открытых стандартах Java [5] и предполагает управление проектами через веб-браузер (с поддержкой Java Virtual Machine) по протоколу TCP/IP.

В редакторе создается только графический дизайн HMI, транслируемый затем на ПЛК, при этом связь между браузером и веб-сервером устанавливается автоматически. Навыков программирования при создании дизайна HMI в редакторе WebVisit не требуется. Рабочий процесс создания HMI состоит из двух следующих этапов.

На первом этапе происходит создание дизайна HMI с помощью основных графических символов и объектов (рис. 1), а также создание связей для этих элементов с выбранными переменными проекта. На втором этапе происходит транслирование созданного дизайна HMI на веб-сервер через встроенный FTP клиент.



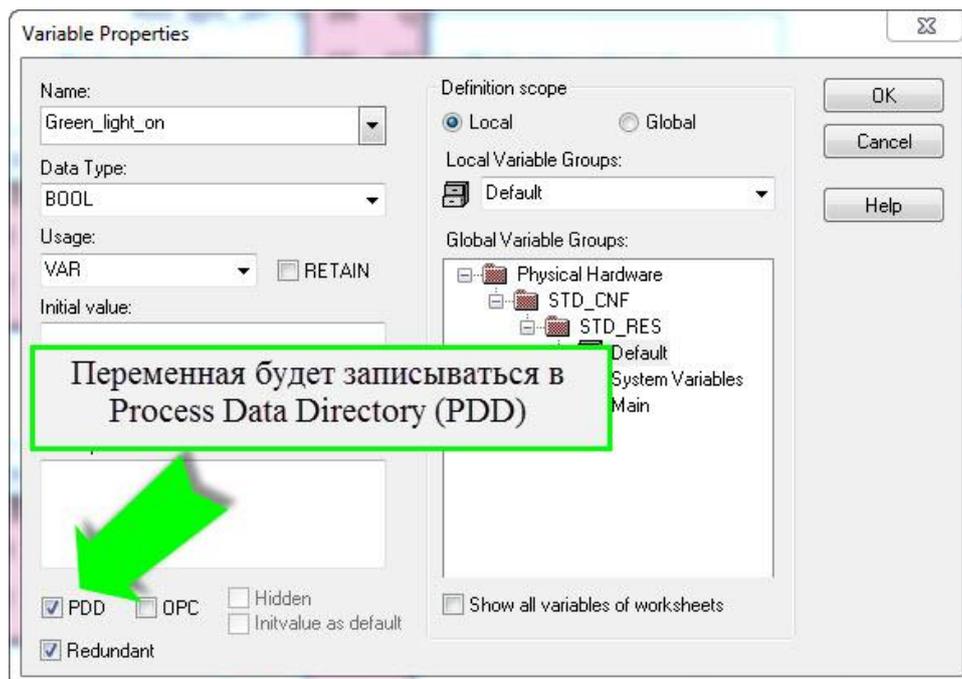
**Рис. 1.** Основные графические символы и объекты редактора WebVisit

До создания дизайна графического веб-интерфейса в основном проекте PC WorX требуется обозначить переменные, которые будут связаны с графическими объектами редактора WebVisit. Для этого в свойствах переменной требуется отметить галочкой пункт PDD, таким образом, помещая переменную в Process Data Directory и открывая к ней доступ при обращении к ПЛК (рис. 2).

После запуска редактора WebVisit создаётся новый проект, следуя указаниям мастера создания дизайна. Мастер создания дизайна предлагает последовательно к заполнению 7 форм, позволяя произвести начальные настройки создаваемого проекта HMI. На первой форме предлагается выбрать профиль с проекта с различными предустановками (по умолчанию – веб-интерфейс на ПЛК), ввести имя создаваемого проекта и выбрать директорию размещения файлов проекта. На второй форме задаётся разрешение для создаваемой формы (по умолчанию 640×480) и период опроса формы (по умолчанию 1000 ms). На третьей форме выбирается стиль элементов из 4 предустановленных вариантов, а на четвёртой – число окон для создаваемого проекта HMI. На пятой форме предлагается установить послойное отображение окон дизайна HMI, вводя, помимо рабочего окна, дополнительно окно заднего фона (background) и переднего фона (foreground). Шестой экран мастера предлагает внедрить в проект дополнительные языки, причём в качестве предустановленных предлагаются английский, французский, немецкий и испанский. Наконец, седьмая форма, предполагает добавление механизма авторизации в виде пароля на открытие дизайна HMI.

После завершения работы мастера на листах проекта размещаются графические элементы (см. рис. 1), которые можно превратить в интерак-

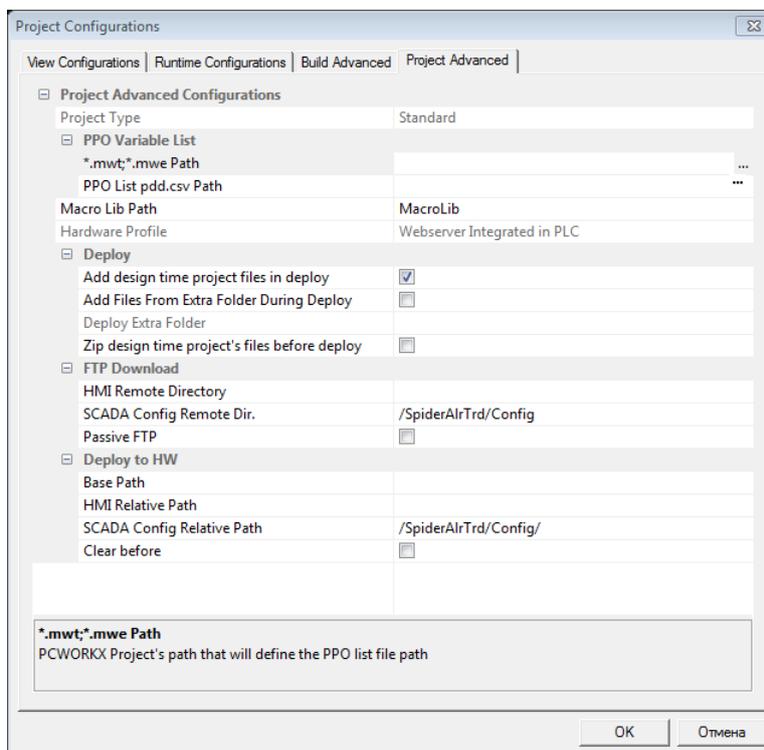
тивные. Для этого в свойствах этих элементов выбираются действия и переменные PPO и задается проверка условий для выбранных действий.



**Рис. 2.** Свойства переменной в PC WorX

Для передачи в редактор WebVisit переменных, выбранных в проекте PC WorX, в редакторе в меню «Project» необходимо открыть окно «Project configuration» и выбрать вкладку Project Advanced (рис. 3).

В появившемся окне в строке «\*.mwt, \*.mwe Path» необходимо выбрать путь к проекту PC WorX. В этом случае все переменные проекта PC WorX, отмеченные галочкой PDD, будут транслированы в редактор WebVisit.

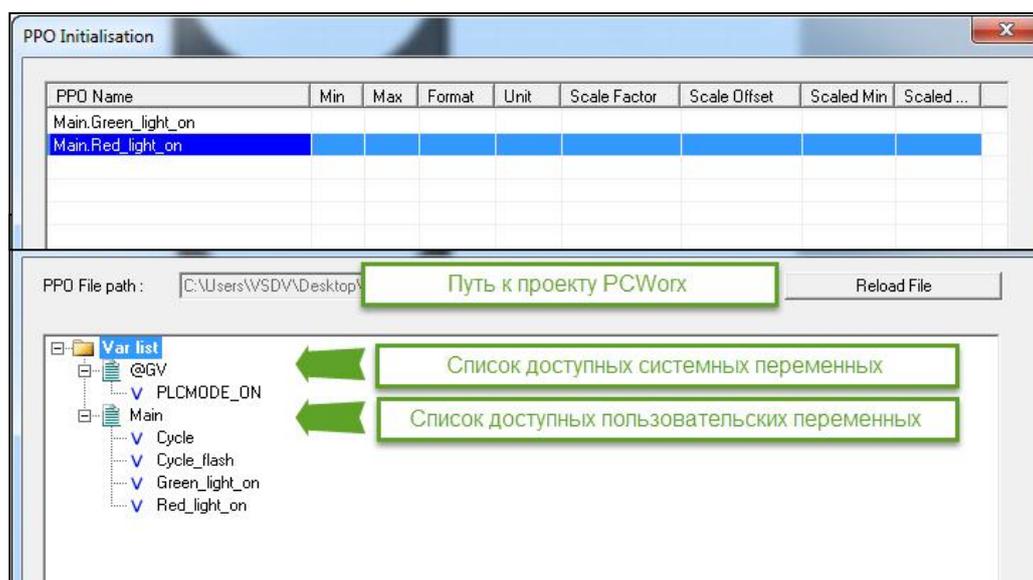


**Рис. 3.** Окно «Project configuration» в WebVisit

Список доступных переменных будет отображен при обращении к нему из меню свойств графических объектов. Пример такого списка переменных изображен на рис. 4а. Для изменения диапазона отображаемых данных необходимые элементы доступны в окне «PPO Initialisation» (Project → Init PPO) (рис. 4б).

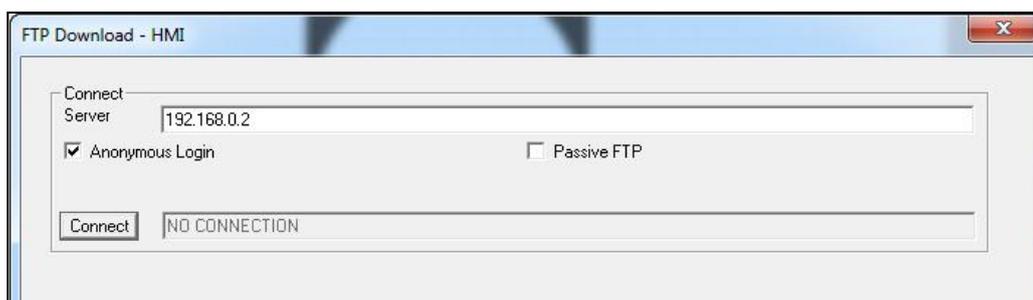
При создании проекта НМІ в процессе работы доступна симуляция создаваемого дизайна кнопкой F5 либо в меню Project → Simulate НМІ. После создания дизайна проекта НМІ его необходимо скомпилировать (Project → Build All или быстрая клавиша F7) и загрузить на FTP-сервер, роль которого по умолчанию выполняет ПЛК. В меню «Project» выбрать «Download Project» и в появившемся окне прописать IP-адрес ПЛК, нажать «Connect» и убедиться в корректности загрузки данных (рис. 5). После загрузки проект будет доступен через веб-браузер по адресу IP.

В качестве примера создадим веб-интерфейс для отображения показания аналогового потенциометра в виде линейной шкалы (BarGraph) в диапазоне от 0 до 10 (согласно отградуированной на потенциометре шкале), размер которой соответствует текущему значению потенциометра. В указанном диапазоне зададим аварийный уровень, при превышении которого линейная шкала изменит цвет с зеленого на красный.



**Рис. 4.** Переменные PPO:

а – фрагмент окна списка переменных PPO; б – фрагмент окна инициализации переменных PPO

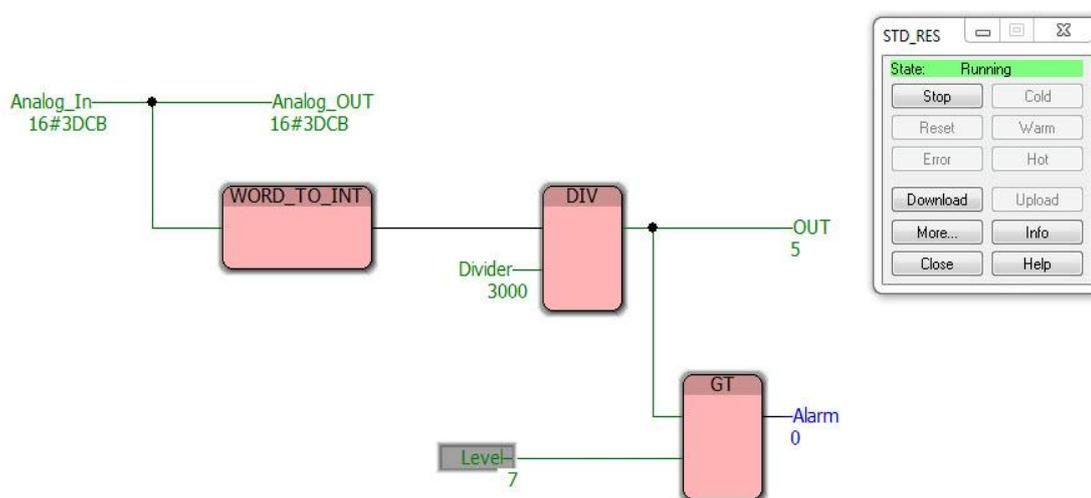


**Рис. 5.** Фрагмент окна FTP Download

Разработаем программу отображения показаний потенциометра в PC WorX для ILC 131 Starterkit, имеющем в комплекте модуль аналогового ввода IB IL AI 2/SF-ME и аналоговый потенциометр, на языке Function Block Diagram [6-8], входящем в состав языков программирования, соответствующих стандарту Международной электротехнической комиссии 61131-3 [9].

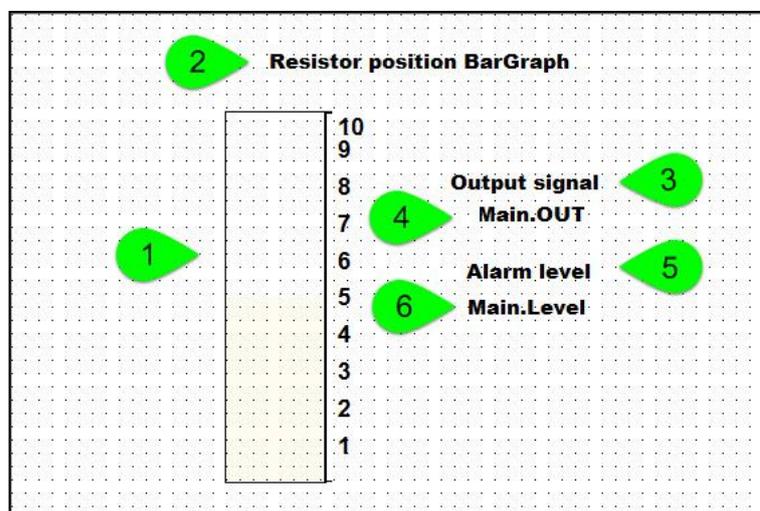
В программе (рис. 6) переменной *Analog\_OUT* соответствует сигнал положения потенциометра в шестнадцатеричном коде. Для преобразования шестнадцатеричного сигнала в десятичный и получения требуемого диапазона использованы блоки *WORD\_TO\_INT* и *DIV*. Блоком *GT* задаем уровень, при превышении которого появляется сигнал *Alarm*. Для отображения работы программы через веб-интерфейс отметим галочку *PDD* в свойствах переменных *OUT* и *Level*

Создадим проект дизайна HMI в WebVisit, воспользовавшись работой мастера создания, выбрав все значения по умолчанию. На рабочую форму поместим элемент *Bargraph*, который будет отображать линейную шкалу (маркер 1 рис. 7), и пять элементов *StaticText* (маркеры 2-6 рис. 7).



**Рис. 6.** Программа в PC WorX на FBD

Элементы *StaticText*, обозначенные маркерами 2, 3 и 5, предназначены только для создания поясняющих надписей и в процессе работы меняться не будут. Ввести поясняющий текст для каждой надписи можно в свойствах выбранного элемента (маркер 1 рис. 8) в выпадающем меню **General** → **Repaints** → **Edit 1** → **Name** (рис. 8, маркер 2).



**Рис. 7.** Рабочее поле создаваемого дизайна

Под надписью «Output signal» требуется отображать значение выходного сигнала. Для этого поместим в требуемом месте элемент *StaticText*, в свойствах которого в меню **General** → **Repaints** → **Edit 1** → **Type** выберем из выпадающего меню тип **PPO** (рис. 9, маркер 1), а в **General** → **Repaints** → **Edit 1** → **Name** из выпадающего меню (рис. 9, маркер 2) выберем в появившемся окне (см. рис. 4а) переменную **OUT**, содержащую информацию об уровне выходного сигнала. Аналогичным образом сопоставим шестому элементу *StaticText* значение переменной *Level*.

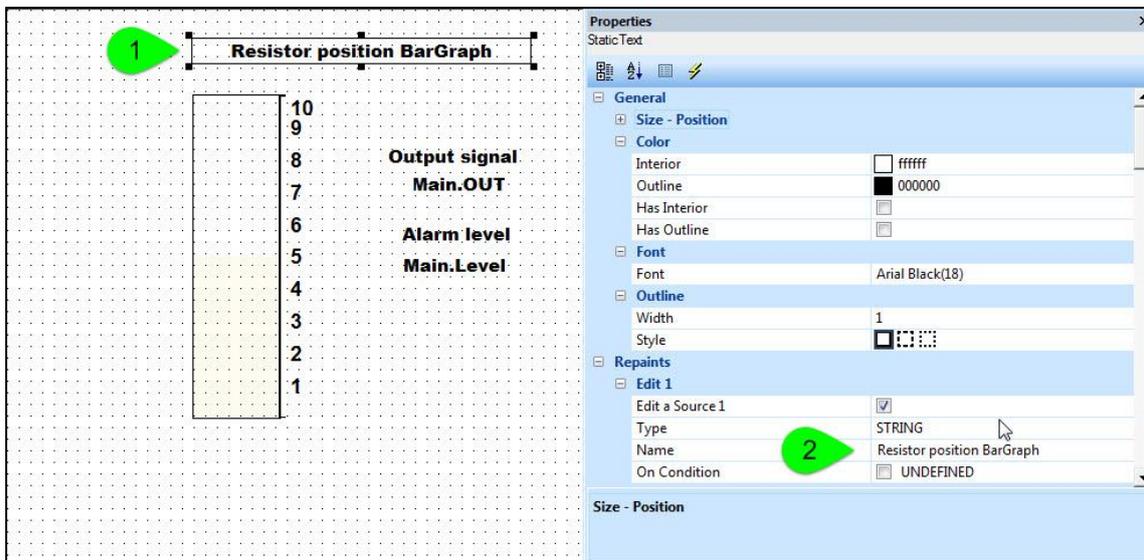


Рис. 8. Меню «Properties» второго графического элемента StaticText

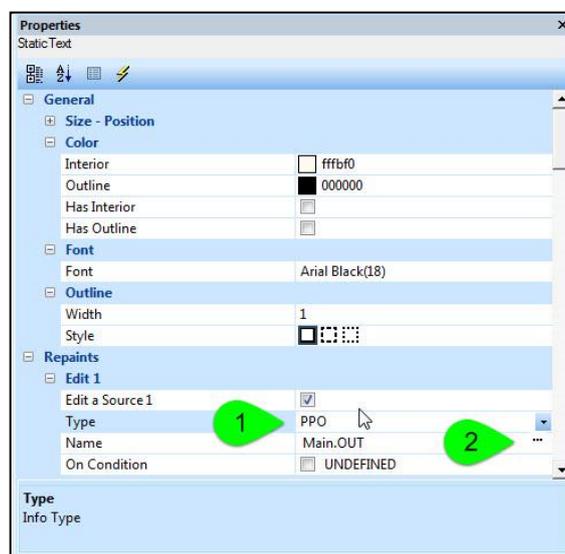


Рис. 9. Меню «Properties» пятого графического элемента StaticText

Для элемента BarGraph в его свойствах в меню General → Border Advanced → Border Colors выберем два цвета (рис. 10, маркер 1), ниже в меню Colors пометим галочками и выберем цвет для элементов меню Use Interior Color 1 и 2 (маркеры 2 и 3 рис. 10). Теперь зададим условие изменения цвета с первого на второй. В меню General → Border Advanced → Border Colors → Conditional Interior Color поставим галочку на опции Has Interior On Condition (заливка по условию) и выбираем условие «больше либо равно» (рис. 10 маркер 4). Далее для Condition Info 1 выбираем значение переменной OUT, а для Condition Info 2 – значение переменной Level (маркеры 5 и 6 рис. 10). Таким образом, получаем условие смены цвета  $Main.OUT \geq Main.Level$ .

Компилируем проект, загружаем его на FTP-сервер, в окне браузера набираем IP-адрес FTP-сервера и разрешаем выполнение Java-апплета, по-

сле загрузки которого открывается разработанный web-интерфейс, показанный на рис. 11.

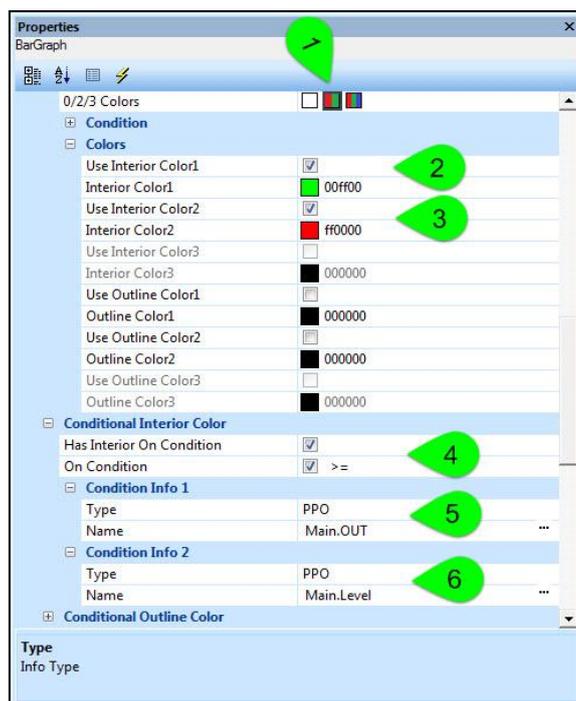


Рис. 10. Меню «Properties» первого графического элемента BarGraph

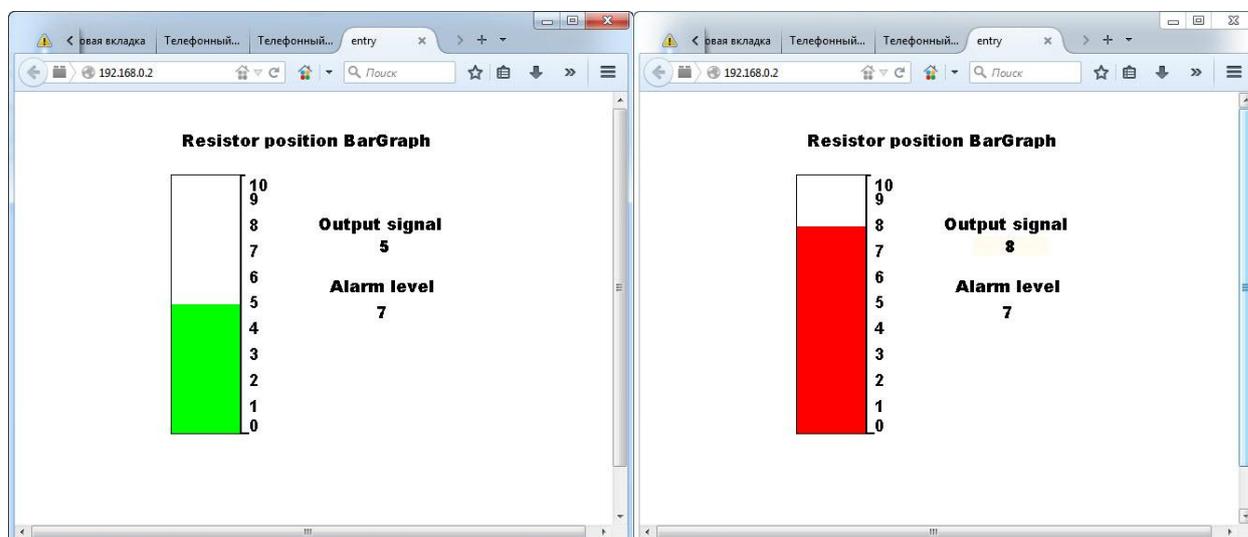


Рис. 11. Web-интерфейс: а –  $OUT < Level$ ; б –  $OUT > Level$

#### Список литературы

1. Зарубецкий Я.А., Шапорин В.О., Шапорина Е.Л. Управление биполярным шаговым двигателем с помощью микроконтроллера Phoenix Contact // Современные информационные и электронные технологии. 2014. Т. 1. № 15. С. 62–63.
2. Зайцев М. В. Маленький контроллер для больших задач или программирование и составление программы ПЛК // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 12. – С. 15–17.

3. Зайцев М. В. Маленький контроллер для больших задач или программирование и составление программы ПЛК // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 29–30.

4. Зайцев М. В. Маленький контроллер для больших задач или программирование и составление программы ПЛК // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 2. – С. 13–16.

5. Кузьмичев А. Б., Рудаков В. В. Многопользовательская архитектура информационной системы // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2015. № 5-1. С. 342–345.

6. Седов В. А., Седова Н. А. Задачи булевой алгебры на языке Function block diagram // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии. Всероссийская научно-практическая конференция. – Кемерово : Изд-во Кузбасского государственного технического ун-та им. Т. Ф. Горбачёва, 2015. – С. 245.

7. Седова Н. А., Седов В. А. Функции принадлежности нечётких множеств на языке Function Block Diagram // Решение. – Пермь : Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического ун-та, 2015. – Т. 1. – С. 249–251.

8. Антипин А. Ф. Особенности программной реализации многомерных логических регуляторов с переменными в виде совокупности аргументов двузначной логики // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 2. С. 30–36.

9. Антипин А. Ф. Вопросы разработки интервально-логических регуляторов на языках программирования стандарта IEC 61131-3 // Молодой ученый. 2014. № 19. С. 168–172.

УДК 656.61.052

*Седова Нелли Алексеевна,*

*к.т.н., доцент, доцент кафедры АИС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
e-mail: nellyfish81@mail.ru*

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АВТОРУЛЕВОГО ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СУДОВ**

Морское судно как объект управления относится к сложным в построении математической модели объектам. Эта сложность обуславливается тем, что на судно в процессе эксплуатации постоянно действует множество внутренних и внешних возмущающих факторов, многие из которых неуправляемы и ненаблюдаемы, и их чрезвычайно сложно, а иногда и невозможно, учесть в управлении.

Интеллектуальные авторулевые представляют собой развитие адаптивных систем управления морским судном по курсу в направлении расширения возможностей выполнения сложных задач в неопределённой среде и/или неполной информации.

К интеллектуальным относятся авторулевые, использующие математический аппарат теории нейронных сетей, нечёткой логики, на основе экспертных систем, генетических алгоритмов или их комбинаций. Использование нейронных сетей [1, 2], способных к обобщению и адаптации, позволяет находить решение быстрее и эффективнее известных алгоритмов моделирования [3]. Так, в работе [4] предложена модель интеллектуально-

го авторулевого, состоящего из регулятора [5] на базе нечёткой логики, параметры которого определяются автоматически генетическим алгоритмом; нейросетевых моделей траекторий движения судов; интеллектуального классификатора. Настоящая работа посвящена представлению результатов компьютерного моделирования, проведённого с целью определения зависимостей среднеквадратической ошибки [6] (СКО) обучения нейронных сетей от типов судов, необходимых для анализа нейросетевых моделей траекторий движения судов.

Компьютерное моделирование проводилось на специально разработанных модулях, имеющих единый графический пользовательский интерфейс, сопряжённый с системой Matlab [7]. Для обучения нейронных сетей с целью получения траекторий движения морских судов использовалась информация, полученная от имитатора сигналов для авторулевых «ИС-2005» [4].

Компьютерное моделирование проводилось для шести различных моделей морских судов (характеристики судов представлены в табл. 1):

- пассажирское судно прибрежного плавания (ПСПП);
- траулер, транспортный рефрижератор (ТР);
- автомобильно-пассажирское судно (АПП);
- танкер;
- супертанкер (СТ).

*Таблица 1*

Характеристики судов

Тип судна	Длина, м	Ширина, м	Осадка, м	Скорость хода max, уз
Траулер	85	15,9	5,6	8; 12; 15
АПП	158	25	6,5	15
ПСПП	35,5	7,2	2,15	8
Танкер	179,9	31	10	15
ТР	107,8	18,2	7,5	15

Для каждого морского судна получены зависимости среднеквадратичной ошибки обучения нейронных сетей (характеристики нейронных сетей приведены в табл. 2) от следующих условий плавания:

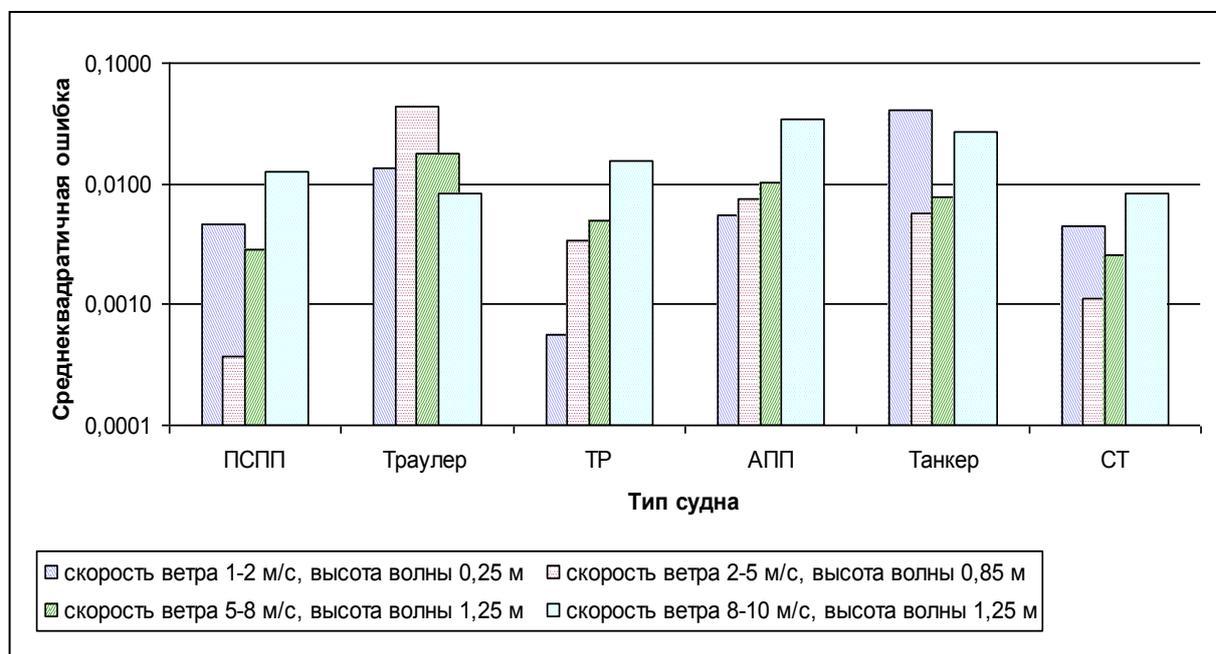
- 1) скорость ветра – 1-2 м/сек, высота волны – 0,25 м;
- 2) скорость ветра – 2-5 м/сек, высота волны – 0,85 м;
- 3) скорость ветра – 5-8 м/сек, высота волны – 1,25 м;
- 4) скорость ветра – 8-10 м/сек, высота волны – 1,25 м.

**Характеристики нейронных сетей, использованных  
в компьютерном моделировании**

№ п/п	Парадигма нейронной сети	Алгоритм обучения	Число циклов обучения
1	прямого распространения	Левенберга-Марквардта	100
2	прямого распространения	Левенберга-Марквардта	500
3	прямого распространения	Левенберга-Марквардта	1000
4	прямого распространения	Моллера	1000
5	рекуррентная Элмана	Левенберга-Марквардта	100
6	рекуррентная Элмана	Левенберга-Марквардта	500
7	рекуррентная Элмана	Левенберга-Марквардта	1000
8	рекуррентная Элмана	Моллера	1000

Обучение нейронных сетей прекращалось, если достигалось предельное число циклов (100, 500 или 1000) обучения или градиент критерия качества достигал значения, меньшего  $10^{-10}$ .

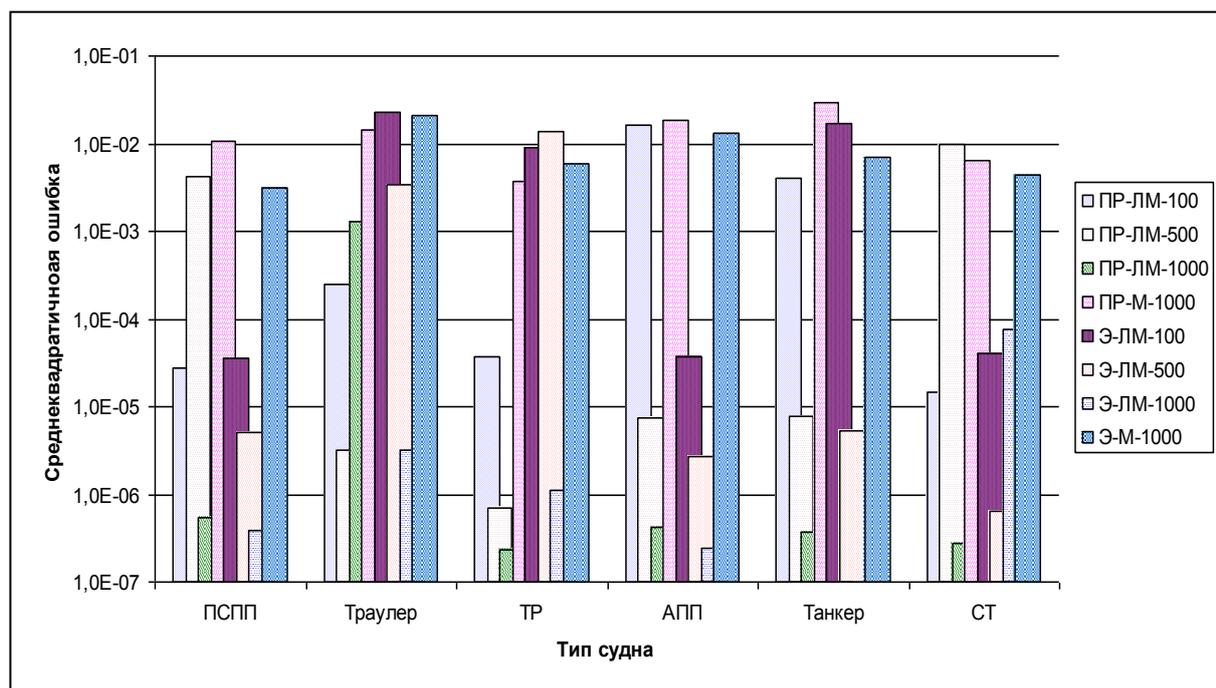
На рисунке 1 приведена полученная зависимость СКО обучения нейронных сетей от указанных (табл. 1) типов судов, причём СКО рассчитывалась средняя по восьми нейронным сетям, характеристики которых указаны в табл. 2. Заметим, что согласно [7] рассчитанная среднеквадратическая ошибка, значение которой менее 0.05, считается удовлетворительной.



**Рис. 1.** Зависимость СКО нейронных сетей от типа судна

На рисунке 2 представлена зависимость СКО обучения нейронных сетей от типа судна, которая рассчитывалась как среднее значение СКО по всем условиям плавания (скорость ветра от 1-2 до 8-10 м/с, высота волны от 0,25 м. до 1,25 м.). На рис. 2 через ПР обозначена нейронная сеть прямо-

го распространения, Э – нейронная сеть Элмана, ЛМ – алгоритм обучения Левенберга-Марквардта, М – алгоритм обучения Моллера, 100, 500 и 1000 – число циклов обучения.



**Рис. 2.** Зависимость СКО обучения нейронных сетей от типа судна

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что разные типы морских судов при различных условиях плавания требуют различные нейросетевые модели, моделирующие траектории движения судов по курсу.

#### Список литературы

1. Земцов А. Н. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания лиц // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2012. Т. 2. № 2. С. 148–152.
2. Фраленко В. П. Методы и алгоритмы обработки потоков данных в многопроцессорных вычислительных комплексах командно измерительных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Переславль-Залесский, 2011. – 21 с.
3. Антипина Е. В., Антипин А. Ф. Применение интеллектуальных технологий для анализа многомерных данных // Молодой ученый. – 2014. – №19. – С. 172–175.
4. Седова Н. А. Интеллектуальная система автоматического управления судном по курсу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Н. А. Седова. – Владивосток, 2009. – 22 с.
5. Глушков С. В., Седова Н. А. Управление курсом судна с использованием интеллектуальной системы // Вестник Морского государственного университета. 2010. № 37. С. 2–8.
6. Бобырь М. В., Титов В. С., Нассер А. А. Оценка числа итераций при обучении мягких нечётких систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 3 (54). С. 30–37.
7. Николаев С.В., Баженов Р.И. Распознавание образов с помощью нейронных сетей в среде MatlabR2009b // Nauka-rastudent.ru. – 2015. – №. 13 (13-2015) / [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://naukarastudent.ru/13/2355/>.

*Солодков Олег Владимирович,  
доцент кафедры РЭС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,  
Веселова Серафима Сергеевна,  
ст. преподаватель кафедры РЭС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,  
Сипач Светлана Александровна,  
курсант 4 курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## **РАДИОВЕЩАНИЕ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ**

В настоящее время, в современном мире радиовещание является одним из важнейших средств массовой информации, влияющим на духовное развитие общества, экономический рост, социальную стабильность и укрепление институтов гражданского общества.

Радиовещание оказывает существенное воздействие на политический и социальный климат современной России. Являясь составной частью культуры страны, радио способствует сохранению языка, традиций, формирует шкалы материальных ценностей общества.

Радиопередающие устройства (РПДУ), объединённые в единые сети радиовещания, выполняют функцию одной из основных систем оповещения населения о чрезвычайных ситуациях, природных и техногенных катастрофах.

Русский физик и электротехник А. С. Попов 7 мая 1895 года продемонстрировал на заседании Русского физико-химического общества в Санкт-Петербурге свой радиоприбор, а 7 мая 2015 года отмечалось 120-летие. 1 января 1926 г. первая в Приморском крае широковещательная радиостанция РА – 17 мощностью 1,5 киловатта вступила в строй и три раза в неделю стала вести радиопередачи, а в 1 января 2016 году отмечалось 80-летие со дня появления радиовещания в Приморском крае (ПК).

В настоящее время было практически полностью свернуто широковещательные радиостанции из-за прекращения бюджетного финансирования, хотя еще в 2013 г. работали 3 радиостанции на СВ-диапазоне: «Маяк», «Радио Россия» и «Голос России». Зарубежные радиостанции на русском языке принимаемые в Приморском крае приведены в табл. 1 и 2 [1,2,3].

Вне крупных городов и отдаленных местах от вещательных радиостанций Приморского края, где КВ радиоприёмник порой единственное средство, чтобы услышать радиовещание.

На данный момент времени нет принципиальной возможности услышать радиостанцию собственной страны, вещающую на русском языке, зато можно услышать КНДР (табл.2), Иран и Индия, Япония, Филиппины, Кувейт и те громко и чётко донесут до русского радиослушателя новости в собственной интерпретации.

Это ситуация ненормальна, когда наша страна не может обеспечить свою огромную территорию радиовещанием.

Таблица 1

Зарубежные радиостанции на русском языке принимаемые в ПК

Название	Страны	Местное время приема	Частота, МГц	Напряженность поля, мкВ
NHC	Япония	15:50	11.700	2500-354
VOC	КНДР	17:45	13.760	35-6.3
		17:50	11.735	1000-200
		18:00	9.875	710-75
VOIRI	Иран	19:00	17.820	10-3
		19:19	21600	25-5
RF/RFE	Филиппины	14:40	17.770	990-140
	Кувейт	15:30	17.770	25-4,0
		16.15	17.770	25-4,0

Таблица 2

Передачи МРК(CRT) на русском языке принимающиеся в ПК

Место передатчика, (мощность, азимут)	Время приема	Частота, МГц	Напряженность поля, мкВ
Сиань (500 , 292)	12:20	17.640	316-44
Урунчи (500, 270)	12:30	15.435	50-17
Сиань (500 , 292)	13:30	17.640	251-44
Цзиньхуа (300, 310)	13:40	17.710	80-46
Сиань (500, 292)	14:30	17.640	316-31
Урунчи (500 , 308)	14:45	15.445	50-20
Урунчи (500, 308)	15:30	15.665	200-31
	16:10	17.710	330-44
Урунчи (500 ,308)	19:15	15.665	205-30
Хух Хото (100 ,345)	20-30	7.390	63-16
Хух Хото (100, 345)	20:35	9.725	3150-630
Шиузяуцань (500, 37)	20:40	11.935	316-63
Хэйлуцзян (600_	21:10	1.323	1.580

В настоящее время оставшиеся УКВ радиостанции не способны обеспечить достаточный уровень радиосигнала на территория Приморского края и в сопредельных территориальных водах, см. табл. 3 [1, 3].

Основные характеристики радиовещания в ПК:

– УКВ радиостанции принципиально не подходят для охвата вещания территориальных вод сопредельных с Приморским краем.

– рельеф большей территории Приморского края не позволяет получить устойчивый прием даже на удалении 30-40 км от радиостанции.

– возможен устойчивый прием радиостанции ведущих вещаний из сопредельных государств.

Таблица 3

Радиовещательные станции Владивостока УКВ-диапазона

Название	Частота	Напряженность поля при h=2,5 в районах		
		Соловей ключ	Мирный	Ключевое
Радио России	71.8	32	33	5
Маяк	69.68	16	5	-
Маяк	107.7	550	2000	100
Вести FM	89.8	108	150	30
VBC	101.7	1800	700	500
Лемма	102.7	2200	700	350
Европа+	104.2	2200	520	200
Владивосток FM	106.4	2000	500	150
Русское Радио	107.0	220	2000	100

Системы радиовещания на СВ- и КВ- диапазонах являются эффективными при освоении арктических районов. Этот вопрос не раз поднимался на правительственном уровне, также мощное радио, помимо решения гражданских задач по распространению радиопрограмм на территории страны, нужно и для обеспечения специфических задач силовых структур [1, 3]. В результате снятия с трансляции и снижения мощности радиовещательных передатчиков, задействованных для вещания государственных программ, снижаются возможности выполнения функций предупреждения и оповещения населения о Чрезвычайных Ситуациях. В настоящее время наиболее доступным, простым и надёжным является оповещение 100% населения с помощью мощного радиовещания ДВ, СВ и КВ диапазонов, способного покрыть 100% территории РФ.

Важной задачей будет восстановление и поддержка дальнего радиовещания на длинных, средних и коротких волнах. Решение этой задачи позволит приступить к модернизации инфраструктуры мощного радиовещания, иначе мы потеряем значительную его часть, а то и весь его потенциал. Выделение мощного радиовещания в отдельное предприятие создаст предпосылки для оптимизации систем радиосвязи и радиовещания, систем оповещения и обеспечения информационной безопасности.

У радио в диапазонах ДВ, СВ и КВ цифровое будущее, и освоение цифровых технологий идет уже сейчас. Система цифрового радиовещания (DRM - Digital Radio Mondiale), ставшая стандартом во всем мире, предлагает высококачественную замену традиционному АМ радиовещанию. На сегодня DRM является единственным цифровым форматом, одобренным Международным союзом электросвязи (МСЭ) для полосы частот ниже 30 МГц, т.е. для диапазонов ДВ, СВ и КВ. Учитывая существенное улучшение качества звука по сравнению с существующим аналоговым АМ-

вещанием, можно ожидать, что DRM скоро станет наиболее используемой технологией для АМ-вещания. [1, 3].

Цифровой стандарт DRM позволяет избавиться от основного недостатка присущего для АМ вещания – низкого качества звучания.

Стандарт DRM позволяет получить качество звукового сигнала близкое, или такое же как в УКВ диапазоне [1 - 3].

Достоинством цифрового стандарта DRM является возможность транслировать программы в стерео режиме, передавать различную дополнительную информацию, передачу сообщений ГО и МЧС в тех полосах, которые выделены для АМ вещания.

Приморский край пространственно расположен на большой территории с различным рельефом, а также обеспечивает суда в территориальных водах, из-за чего радиовещание на УКВ диапазоне не может обеспечить всю территорию радиосвязью и радиовещанием.

Чтобы обеспечить территории радиовещанием необходимо:

1. Восстановить радиостанции СВ и КВ-диапазонов;
2. Увеличить финансирование ДВ, СВ и КВ-радиостанций на территории ПК и ДВ региона;
3. Увеличить информационные поля радиовещания отечественных радиостанций на Дальнем Востоке.

#### Список литературы

1. «Радиовещание в России в 2013 году Состояние, тенденции перспективы развития» Отраслевой доклад. - М.: Федеральное агентство по печати и массовым коммуникациям, 2014.
2. «World Radio TV Yandbook» The directory of global broadcasting. [Электронный ресурс], 2015.
3. О Т Ч Ё Т по научно-исследовательской работе «Разработка концепции внедрения DRM радиовещания в Российской Федерации»/ Выполнено по Государственному Контракту №19/03-05 с Федеральным Агентством по печати и массовым коммуникациям. - Санкт- Петербург, 2006г.

**Убанкин Евгений Иванович,**  
*к.т.н., доцент, доцент кафедры РЭРС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*  
**Павликов Сергей Николаевич,**  
*к.т.н., зав. кафедры РЭРС, профессор, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*  
**Пузин Олег Владимирович,**  
*начальник кафедры, ДВФУ,*  
**Железный Виктор Иванович,**  
*электроник кафедры РЭРС, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## **ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Программный комплекс «Информационно-образовательная среда дистанционного образования» [1] предназначен для автоматизации образовательного процесса и реализации дистанционных технологий в обучении.

Программный комплекс может быть применен в образовательных учреждениях высшего, дополнительного и среднего профессионального образования. Программный комплекс представляет собой систему программных средств организации и сопровождения процесса дистанционного обучения, включая технологию удалённого тестирования. Программный комплекс оснащён удобным интерфейсом, сопровождаемым инструкциями для администраторов и пользователей всех уровней. Тип ЭВМ: IBM – совместимые. Язык программирования: Perl, PHP, MySQL. Операционная система: Windows.

Объем программного комплекса для ЭВМ: 69,2 МБ (с инструкциями). Возможности комплекса. Комплекс может использоваться, как часть системы виртуального института для дистанционного обучения, или как самостоятельный продукт. Любые виды тестов: контрольный, психологический, имеется возможность:

- использования в одном тесте любых типов ответов и вопросов в каждом задании или теме;
- распределения по темам, размещения заданий и ответов в случайном порядке;
- автоматической разбивки по билетам в случайном порядке;
- автоматического выставления оценок, в зависимости от набранных баллов или правильных ответов;
- назначения каждому вопросу или ответу любого количества баллов.

В ходе тестирования всегда показывается оставшееся время, фамилия тестируемого, название теста, и статистика, если разрешено. Также можно показывать комментарии к вопросам, если таковые предусмотрены в тестах. В тестах могут использоваться медиа-файлы (рисунки, видео, ау-

дио, флеш и др.) Удобный интерфейс пользователей (панель администрирования и настроек). Требования и возможности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Требования и возможности ПК «Информационно-образовательная среда дистанционного образования»

Требования	Возможности
<b>Системные требования</b>	
Необходимость установки дополнительного программного обеспечения (ПО) на компьютере клиента.	Нет, можно тестироваться с любого компьютера, подключенного к Интернету или в локальной сети.
Необходимость установки отдельного сервера.	Нет, система м.б. установлена как модуль на любой сайт на сервере Apache с PHP MySQL (свободно распространяемые) или на любом ПК
<b>Типы аттестационных педагогических измерительных материалов</b>	
Контрольные	Да
Психологические	Да
Смешанные	Да
<b>Типы заданий (вопросов)</b>	
Одиночный выбор	Да
Множественный выбор	Да
Соответствие (два столбца таблицы привести в соответствие)	Да
Упорядоченный список	Да
Открытый, с возможностью ввода с клавиатуры и вставки в ответ файла	Да
Смешивание разных заданий в одном тесте	Да
<b>Администрирование</b>	
С любого компьютера не требующего установки дополнительного ПО	Да
Разграничения прав администраторов	Да
<b>Администрирование: группы и пользователи</b>	
Администрирование: настройки тестирования	
Расположение вопросов в случайном порядке	Да
Расположение ответов в случайном порядке	Да
Разбивка на темы	Да
Разбивка на билеты в случайном порядке	Да
Возможность пропустить вопрос и ответить позже	Да
Возможность вернуться на предыдущий	Да
Установка баллов при множественном выборе индивидуально на каждый ответ	Да
Настройки отчетов	Много, возможно добавление
Возможность печати	Имеется

Любой тест имеет индивидуальные настройки:

- возможность возврата на предыдущий вопрос (да или нет);
- возможность пропустить и ответить позже (да или нет);
- показывать сообщения о правильности ответа (да или нет);
- показывать статистику (количество набранных баллов, правильных ответов) (да или нет);
- перемешивание вопросов и/или вариантов ответов;
- разбивать на билеты (да или нет).

Установка необходима для случаев, если составитель теста ошибся и вопросы повторяются или по иным причинам.

Отчеты создаются, как по группам, так и подробные индивидуальные, причём с настройкой вида полей для отчета (время начала и окончания тестирования, резюме, баллы и т.д.), есть возможность генерации отчета для печати. Системные требования минимальные: на компьютере клиента не требуется установки дополнительного программного обеспечения, только д.б. разрешено выполнение Java скриптов, обычно установлено по умолчанию. Это означает, что можно тестироваться с любого компьютера, имеющего выход в Интернет со скоростью от 100 Кбит/с. Система удалённого тестирования обладает еще очень многими возможностями. При необходимости возможно редактирование, совершенствование и т. д.

Перспективы развития программного комплекса.

Создание единого автоматизированного дистанционного лабораторного центра с современным лабораторным и учебно-методическим обеспечением, связанного через информационные сети со всеми обучаемыми. Это позволяет выйти на качественно новый уровень инженерного образования. Подобная централизация учебных лабораторий также существенно снижает материальные затраты на модернизацию. Перевод лабораторного практикума на дистанционные образовательные технологии. Это позволит повысить, как общедоступность (доступ из любой географической точки и в любое время), так индивидуализацию и качество обучения (студент самостоятельно будет выполнять лабораторную работу, а не группой за одной лабораторной установкой), сократить учебные площади, оптимизировать учебное расписание.

Информационно-образовательная среда электронного обучения используется вузами ДВФУ, ВГУЭС, ТОВВМУ и МГУ им. адм. Г.И. Невельского для проведения студенческих региональных олимпиад по инфокоммуникационным технологиям и системам связи с 2014 года.

#### Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010617192. Россия, Информационно-образовательная среда электронного обучения / Убанкин Е.Н. и др.

*Чинчукова Елена Павловна,*

*ст. преподаватель кафедры МИЛ, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## **РОБАСТНО-АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ ОБЪЕКТАМИ СО СТРУКТУРОНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ**

В данной статье описана усовершенствованная модель МПО с робастно-адаптивной настройкой регулятора.

В предыдущих работах, в том числе и представленных на 58-ой международной молодежной научно-технической конференции МОЛОДЁЖЬ – НАУКА – ИННОВАЦИИ [4,8,9], рассматривалось управление МПО с использованием теоремы Харитоновой [5]. Представленный способ обеспечивает нужное качество системы управления и ее робастную устойчивость, при неопределенности параметров модели МПО. Ранее мы настраивали одну дифференциальную составляющую ПИД регулятора, что обеспечивало удовлетворительное качество управления моделью МПО. Для улучшения качества управления системой с неопределенными параметрами в данной работе настраиваются все параметры регулятора.

Примером систем с неопределенными (переменными) параметрами являются подвижные объекты, такие как корабль, самолет, ракета. Вследствие выгорания топлива (изменения нагрузки) у подвижного объекта происходит изменение массы и моментов инерции. А если объект при своем движении меняет скорость и высоту, то возможно изменение его аэродинамических коэффициентов [3].

Системы управления объекты с неопределенными параметрами обычно являются адаптивными. Как правило, адаптивное управление опирается на приведение математической модели объекта к виду, когда неопределенные параметры группируются в некоторый вектор, который умножается на матрицу известных функций измеряемых координат системы. Знание математической структуры модели является необходимым (но порой недостаточным) условием параметризации уравнений на основе матриц известных функций (матриц-регрессоров) [1].

Робастные (грубые, нечувствительные) методы являются альтернативой адаптивным методам в условиях априорной неопределенности моделей. Робастные алгоритмы управления, в некоторой мере, могут компенсировать недостаток информации о структурных свойствах объекта управления [2]. Системы управления с робастным методом являются нечувствительными к различного рода неопределенностям.

Часто для улучшения качества управления сложными объектами (к которым относятся и объекты с неопределенными параметрами) используются адаптивно-робастные методы – когда настройка параметров проис-

ходит согласно заданному качеству, например заданной «степени устойчивости» [4].

Использование теоремы Харитонова [6] для определения устойчивости системы с неопределенными параметрами возможно при определении их граничных значений. Предполагая что неопределенные параметры изменяются в известном диапазоне, построим систему управления моделью МПО с помощью ПИД-регулятора, и рассчитаем согласно теореме Харитонова настройку параметров ПИД-регулятора.

Ранее [8,9] настройка дифференциальной составляющей ПИД регулятора обеспечивала устойчивость модели МПО со значениями неопределенных параметров в диапазонах: для J (момента инерции МПО) от 5 до 10 ед.измерения, для Kс (коэффициента вязкого сопротивления) от 1 до 5 ед.измерения. Изменим диапазоны значений рассматриваемых, для приближения экспериментальной модели к реальному МПО. Пусть J изменяется от 50 до 100, а Kс от 20 до 50.

Построенная система в пакете Matlab показана на рис. 1.

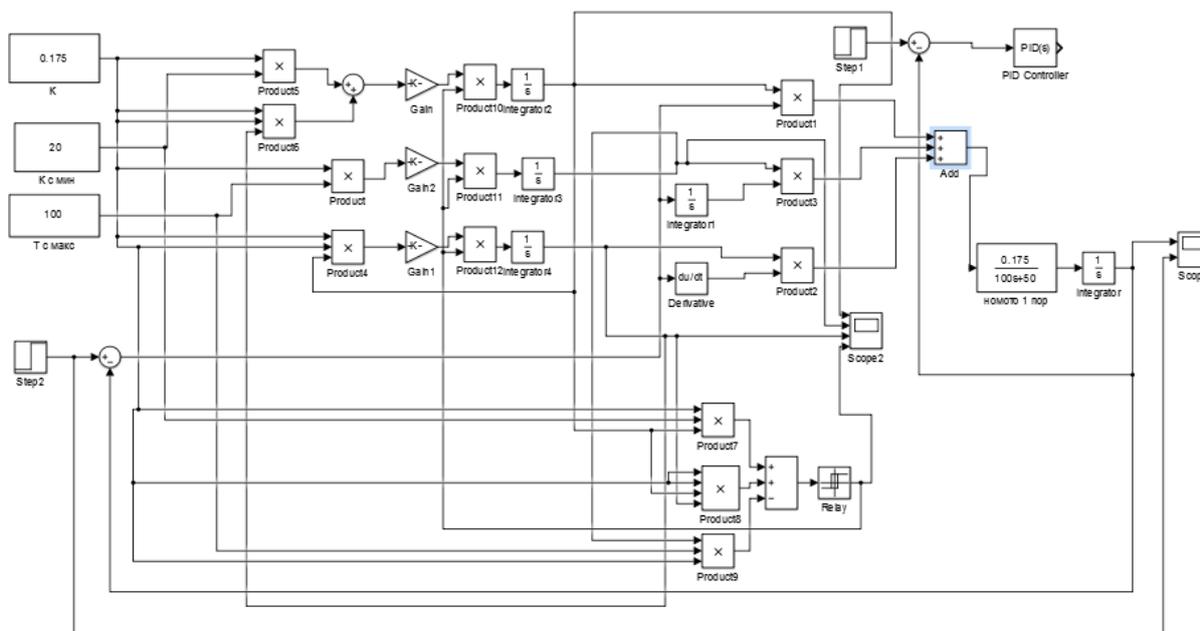


Рис. 1. Система управления

### Расчеты настраиваемых параметров ПИД-регулятора

Передаточная функция рассматриваемой системы:

$$S^2(JS + K_C) + K(K_{\pi}S + K_{\text{д}} + K_{\text{н}}) = 0 \quad (1)$$

где J – коэффициент, отображающий момент инерции МПО, Kс – коэффициент, который отражает вязкость воды, Kп – пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора, Kд – дифференциальный коэффициент ПИД-

регулятора,  $K_i$  – интегральный коэффициент ПИД-регулятора,  $K$  – постоянный коэффициент модели МПО.

Для дальнейших вычислений приведем ее к виду:

$$JS^3 + (K_c + KK_d)S^2 + KK_pS + KK_i = 0 \quad (2)$$

исходя из теоремы Харитонова [5] для системы 3-го порядка достаточно чтобы был положителен полином Харитонова  $Q_1$ :

$$Q_1(S) = a_{0_{max}}S^3 + a_{1_{min}}S^2 + a_{2_{min}}S + a_{3_{max}} \quad (3)$$

По критерию Найквиста  $Q_1$  положителен, если неотрицательны все его коэффициенты и определитель матрицы его коэффициентов, который вычисляется по следующей формуле:

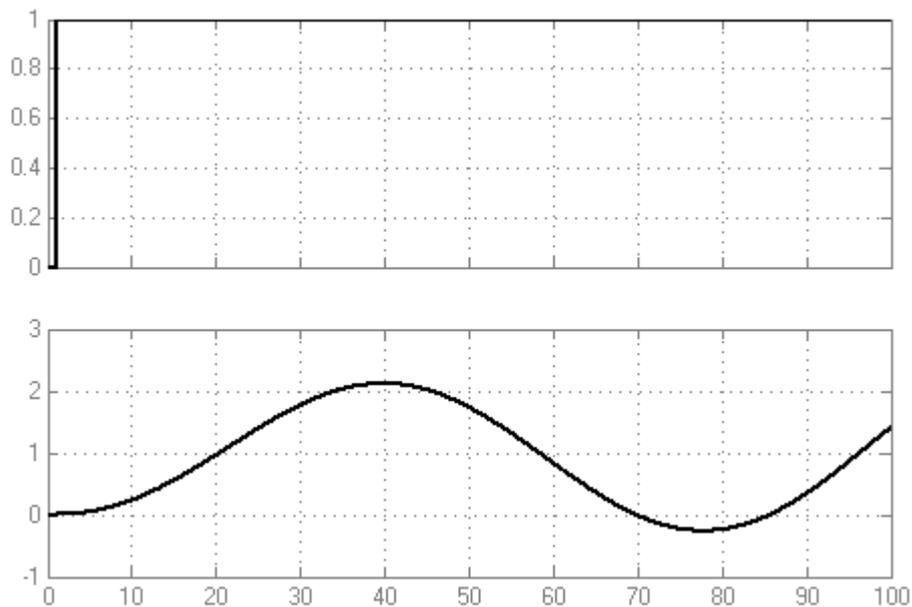
$$\Delta_2 = (K_{c_{min}} + KK_d)KK_p - KK_iJ_{max} \quad (4)$$

Далее для настройки коэффициентов ПИД-регулятора воспользуемся градиентным методом и полученные вычисления применим для системы управления МПО в пакете Matlab.

$$\begin{aligned} \dot{K}_d &= \gamma K^2 K_p \\ \dot{K}_p &= \gamma K (K_{c_{min}} + K_d K) \\ \dot{K}_i &= \gamma K J_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

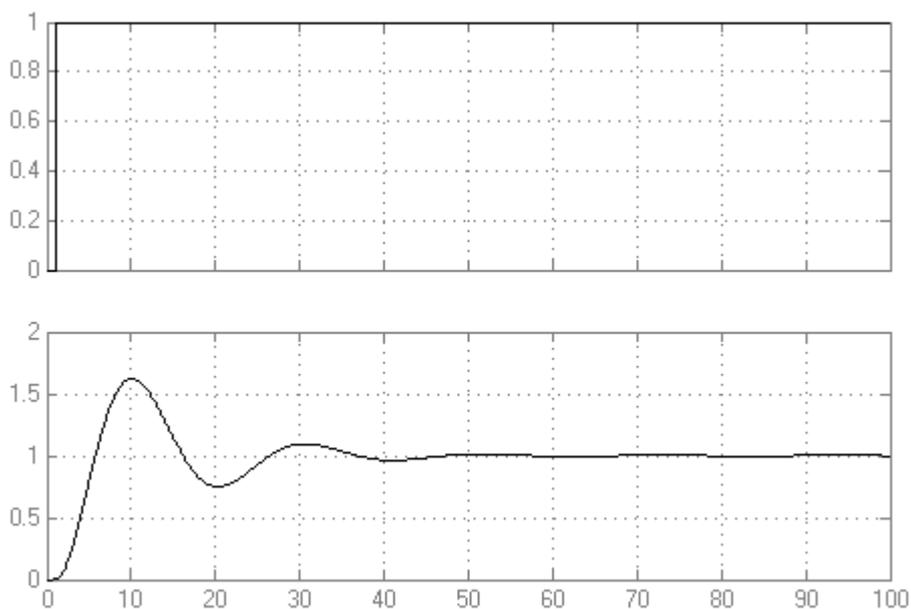
### Процесс настройки

Начальные значения параметров регулятора зададим таким образом, чтобы система была не устойчивой и расхождение в значениях заданного курса и курса модели было большим. Для этого воспользуемся блоком PID Controller. Входной (заданный курс) и выходной (движение модели) сигналы показаны на рис. 2.



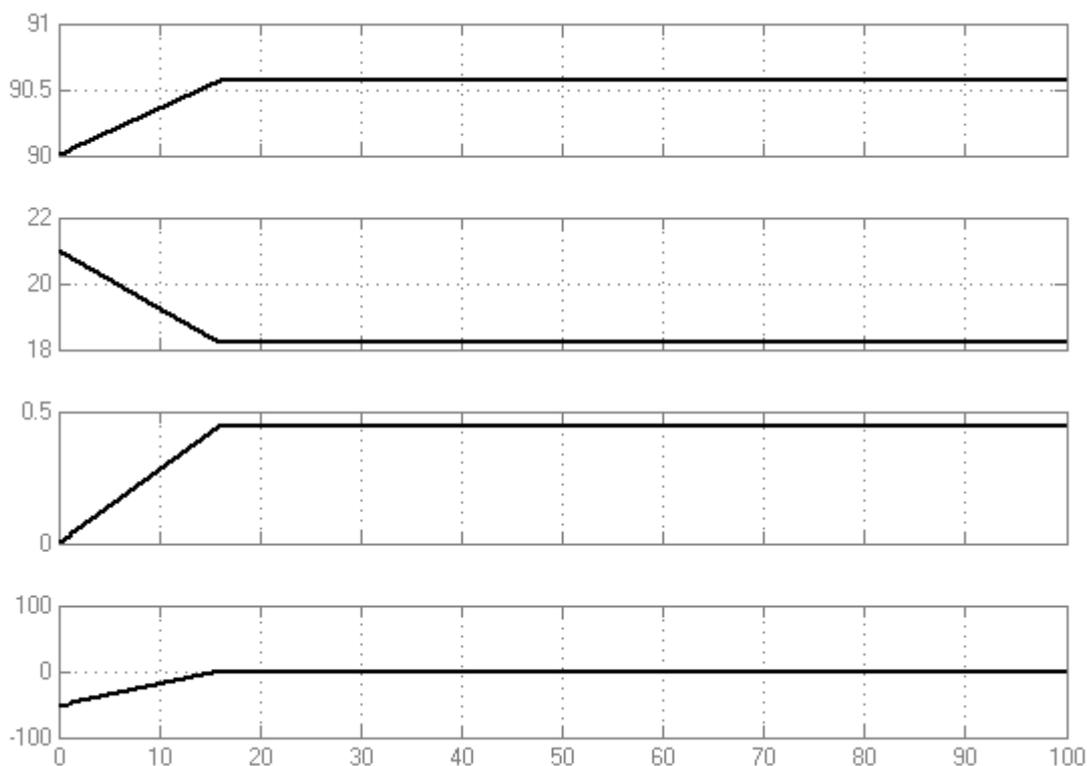
**Рис 2.** Верхний график — входной сигнал, нижний график — выходной

Далее зададим такие же начальные условия в настраиваемом ПИД-регуляторе, после настройки выходной и входной сигналы модели совпадают (рис.3).



**Рис. 3.** Верхний график — входной сигнал, нижний — выходной

Настройка параметров регулятора (рис. 4) прекращается как только определитель первого полинома Харитонова становится положительным.



**Рис. 4.** Пропорциональная, интегральная, дифференциальная составляющая и определитель первого полинома Харитонова (сверху вниз)

## Выводы

Теорема Харитонова для определения устойчивости системы и адаптивная настройка параметров регулятора образуют при совместном применении адаптивно-робастный подход в управлении объектами со структурно-параметрическими неопределенностями.

Данный подход позволяет управлять объектами со структурно-параметрической неопределенностью на примере МПО. Настройка параметров регулятора позволяет добиться необходимого качества управления, согласно установившимся выходным сигналам.

## Литература

1. Андриевский Б.Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления : СПб : Наука, 2000. 475 с.
2. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. -Изд. 4-е, перераб. и доп. -СПб.: Профессия, 2003. -752 с.: ил.
3. Дыда А. А., Адаптивное и нейросетевое управления сложными динамическими объектами : Владивосток : Дальнаука, 2006. 149 с.
4. Дыда А.А., Чинчукова Е.П., Воробьева С.А., Построение робастно-устойчивой системы управления курсом судна, Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011 № 1. С. 107-111.

5. Ким Д.П., Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 288 с.

6. Чинчукова Е. П., Устойчивость системы управления морскими подвижными объектами с параметрической неопределенностью, Сборник докладов 58-й международной молодежной научно-технической конференции, посвященной 120-летию морского образования в Приморском крае. 2010. Том 1. С. 107..

7. Чинчукова Е.П. Адаптивно-робастное управление объектами со структурно-параметрической неопределенностью, Сборник докладов 59-й международной молодежной научно-технической конференции, 2011. Том 1. С. 178..

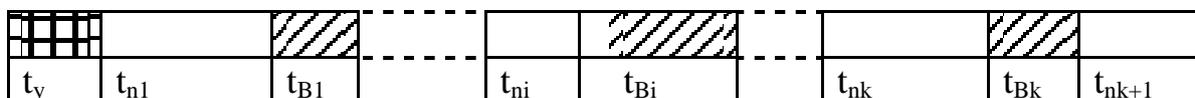
УДК 621.391

**Шевцов Александр Васильевич,**  
*доцент кафедры АСИБ, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
**Любавский Глеб Алексеевич,**  
*студент 5-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
**Перцев Алексей Олегович,**  
*студент 5-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛИНИИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ КАНАЛА СВЯЗИ

Передача сообщения по радиолинии декаметрового диапазона происходит в условиях, возникающих по различным причинам отказов канала, при которых качество связи оказывается ниже заданных требований.

Процесс передачи сообщений по такому каналу состоит из времени установления связи  $t_y$  и чередующихся интервалов пригодного состояния канала длительностью  $t_{nj}$  и состояния восстановления длительностью  $t_{Bj}$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Процесс передачи сообщений по радиолинии декаметрового диапазона

Оценка влияния различных по длительности  $t_B$  отказов канала на эффективность радиолинии может быть произведена по вероятности своевременной передачи сообщений объема  $\Theta$ .

Для ее нахождения предположим, что  $T_D$  – допустимое время пребывания сообщения в системе связи;  $T_\theta$  – время передачи сообщения объемом  $\Theta$  по безотказному каналу. Тогда при условии, что за время  $T_D$  в канале связи произойдет  $k$  отказов длительностью  $t_B$ , вероятность своевременной передачи сообщений по такому каналу найдется как вероятность того,

что время установления связи в канале меньше времени  $T_D - T_\theta$  и длительность первого интервала пригодного состояния канала связи  $|t_{n1}| > T_\theta$ , или как вероятность того, что суммарное время восстановления канала связи меньше времени  $T_D - T_\theta - t_y$  и длительность  $(k+1)$ -го интервала пригодного состояния канала такова, что позволяет закончить передачу сообщения объемом  $\Theta$ .

Полагая процессы отказов и восстановлений канала связи независимыми, вероятность своевременной передачи сообщения можно представить в виде:

$$P_\theta = P(t_y < T_D - T_\theta)P(T_\theta < t_{n1}) + P(\sum_{i=1}^k t_{Bi} < T_D - T_\theta - t_y) \times \\ \times P(t_{nk+1} > T_D - \sum_{i=1}^k t_{ni}) \quad (1)$$

Так как  $k$  может принимать любые значения, то вводя обозначения

$$T_{Bk} = \sum_{i=1}^k t_{Bi}; T_{nk} = \sum_{i=1}^k t_{ni}$$

можно переписать (1) следующим образом:

$$P_\theta = F_{t_y}(T_D - T_\theta)[1 - F_{t_{n1}}(T_\theta)] + \int_0^{T_D - T_\theta} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} F_{t_{Bk}}(T_D - T_\theta - t_y) \times \right. \\ \left. \times [1 - P(t_{nk+1} > T_D - T_{nk})] \right\} dt_y \quad (2)$$

Будем считать, что функции распределения вероятностей случайных величин  $t_{ni}$ ,  $t_{Bi}$  и  $t_y$  известны, тогда (2) можно представить как:

$$P_\theta = F_{t_y}(T_D - T_\theta)[1 - F_{t_{n1}}(T_\theta)] + \int_0^{T_D - T_\theta} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} F_{t_{Bk}}(T_D - T_\theta - t_y) \times \right. \\ \left. \times \int_0^{T_\theta} [1 - F_{t_{nk+1}}(T_\theta - T_{nk})] \omega_{T_{nk}}(T_{nk}) dT_{nk} \right\} \omega_{t_y}(t_y) dt_y. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет определить вероятность своевременной передачи сообщений для случая, когда состояние восстановления в радиолинии возникает по разным причинам.

Для рассмотрения процесса передачи сообщения с использованием автоматизированной радиолинии, предполагается, что она находится в рабочем состоянии  $C_1$  в котором осуществляется передача сообщения корреспонденту в течение случайного времени  $t_n$  на  $i$ -й частоте определенной группы частот. Когда же качество принимаемой информации становится ниже требуемого, по команде корреспондента происходит смена частоты в группе за случайное время  $t_2$  т. е. радиолиния переходит из состояния  $C_1$  в состояние смены частоты  $C_2$ . При этом выбор новой частоты в группе производится на основе того или иного критерия. В случае непригодности для передачи сообщения всех частот аналогично происходит переход на другую, вполне определенную для обоих корреспондентов, группу частот, при этом в течение случайного времени  $t_3$  радиолиния будет находиться в состоянии смены группы частот  $C_3$ . Если сразу после смены группы частот не удалось возобновить обмен информацией, то снова начинается этап установления связи – состояние  $C_4$ . Тем самым в процессе передачи сообщения радиолиния последовательно переходит из одного состояния в другое [1].

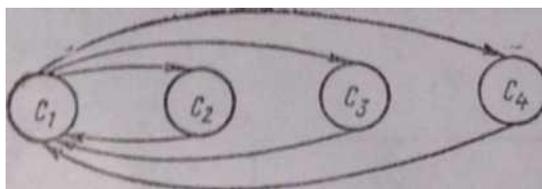


Рис. 2. Графа смены состояний радиолинии

Если рассматривать только моменты смены состояний радиолинии, то процесс переходов из состояния в состояние есть не что иное, как полумарковский процесс с четырьмя состояниями [2].

Величины  $P_{ij}(t)$  определяются как условные вероятности того, что радиолиния находится в состоянии  $C_i$  не более времени  $t$ , а затем переходит в состояние  $C_j$ .

Тогда графу смены состояний (рис. 2) можно поставить в соответствие матрицу условных вероятностей перехода радиолинии из состояния в состояние;

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & 0 & 0 & 0 \\ P_{31} & 0 & 0 & 0 \\ P_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Удобно ввести величины  $a_2, a_3, a_4$  – вероятности того, что состояние  $C_1$  сменится состоянием  $C_i, i = 2, 3, 4$ , соответственно. Очевидно  $a_2 + a_3 + a_4 = 1$ .

Для определения вероятностей  $P_{ij}(t)$  удобно учесть, что на компактных группах частот, которые выделяются для работы радиолинии, длительности интервалов пригодности частот  $t_n$  подчиняются одному и тому же закону распределения. С учетом этого условные вероятности для (4) можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned}
P_{12}(t) &= a_2 P(t_n \leq t) = a_2 F_{t_n}(t); \\
P_{13}(t) &= a_3 F_{t_n}(t); \quad P_{14}(t) = a_4 F_{t_n}(t); \\
P_{21}(t) &= F_{t_n}(t); \quad P_{31}(t) = F_{t_n}(t); \\
P_{41}(t) &= F_{t_n}(t) * F_{t_n}(t);
\end{aligned} \tag{5}$$

где \* – операция свёртки.

Рассматриваемый четырехмерный процесс удобно свести к альтернирующему процессу с состояниями  $C'_1$  и  $C'_2$  [2]. Состоянию  $C'_1$  ставятся в соответствие следующие условные вероятности пребывания в нем:

$$P_{C'1}(t) = P_{12}(t) + P_{13}(t) + P_{14}(t),$$

а состояния  $C_2 \div C_4$  принимаются за одно состояние – состояние восстановления канала  $C'_2$ , вероятность нахождения радиолинии в котором:

$$P_{C'2}(t) = a_{12}P_{21}(t) + a_{13}P_{31}(t) + a_{14}P_{41}(t)$$

С учетом (5) и условие нормировки для вероятностей  $a_j$ ,  $j = \overline{2,4}$ , последние два выражения можно представить в виде

$$P_{C'1}(t) = F_{t_n}(t), \tag{6}$$

$$P_{C'2}(t) = F_{t_B}(t) = a_2 F_{t_2}(t) + a_3 F_{t_3}(t) + a_4 F_{t_2}(t) * F_{t_y}(t). \tag{7}$$

Используя (3), (6) и (7), можно определить вероятность своевременной передачи информации по радиоканалу с различными отказами, но для этого надо знать законы распределения случайных величин  $t_1, t_2, t_y, t_n$ . Практика работы с реальными радиоканалами показала, что длительность  $t_n$  в большинстве случаев подчиняется экспоненциальному закону распределения с параметром  $\lambda_n$ . То есть, можно полагать, что закон распределения  $t_n$  инвариантен относительно номера группы частот, а тогда можно показать, что  $k$ -я сумма этих величин  $T_{nk}$  будет подчиняться гамма-распределению. В существующих радиолиниях в принципе случайные величины  $t_2$  и  $t_3$  определяются временем передачи команд управления и перестройки передатчиков и приемников на новые рабочие частоты. Поскольку эти случайные величины имеют малую дисперсию, их для простоты математических выкладок можно принять постоянными, причем для них, как правило,  $t_2 < t_3$ . Время  $t_y$  также можно полагать распределенным по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda_y$ . Тогда, считая случайные величины  $t_{Bi}$  независимыми с одним и тем же законом распределения, можно, воспользовавшись характеристическими функциями этих величин, определить плотность распределения вероятностей их  $k$ -й суммы:

$$\omega_{T_{Bk}}(T_{Bk}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [a_2 e^{i\omega t_2} + a_3 e^{i\omega t_3} + a_4 \frac{\lambda_y}{\lambda_y - i\omega} e^{i\omega t_3}]^k e^{-i\omega T_{Bk}} d\omega. \tag{8}$$

Вычисление интеграла в правой части (9), позволяет найти интегральную функцию распределения вероятностей случайной величины  $T_{Bk}$ . После этого, учитывая, что законы распределения вероятностей случайных величин  $t_y$  и  $T_{Bk}$  известны, на основе (3) можно определить вероятность своевременной передачи сообщений по радиоканалу с различными типами отказов:

$$\begin{aligned}
 P_\theta = e^{-\lambda_n T_\theta} & \left\{ F_{T_y}(\tau_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda_n T_\theta)^k}{k!} \left\{ a_2^k F_{T_y}[\tau_2(k)] + a_3^k F_{T_y}[\tau_3(k)] + \right. \right. \\
 & + a_4^k k \left\{ F_{T_y}[\tau_3(k)] - S_{t_y}[k, \tau_3(k)] \right\} + \sum_{i=1}^{k-1} C_k^i a_2^{k-i} a_3^i F_{T_y}[\tau_4(k, i)] + \\
 & + \sum_{i=1}^{k-1} C_k^i a_2^{k-i} a_4^i i \left\{ F_{T_y}[\tau_4(k, i)] - S_{t_y}[i, \tau_4(k, i)] \right\} + \\
 & + \sum_{i=1}^{k-1} C_k^i a_3^{k-i} a_4^i i \left\{ F_{T_y}[\tau_3(k)] - S_{t_y}[i, \tau_3(k)] \right\} + \\
 & \left. \left. + \sum_{i=1}^{k-1} C_k^i a_2^{k-i} \sum_{j=1}^{i-1} C_j^i a_3^{i-j} a_4^j j \left\{ F_{T_y}[\tau_4(k, i)] - S_{t_y}[j, \tau_4(k, i)] \right\} \right\} \right\},
 \end{aligned} \tag{9}$$

где  $F_{T_y}(x) = 1 - e^{-\lambda_y x}$ ,  $x = \tau_i(\cdot)$ ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $\tau_1 = T_d - T_\theta$ ;  $\tau_2(k) = \tau_1 - kt_2$ ;

$$\tau_3(k) = \tau_1 - kt_3; \tau_4(k, i) = \tau_1 - (k-i)t_2 - it_3;$$

$$S_{t_y}(\varepsilon, x) = e^{-\lambda_y x} \sum_{m=0}^{\varepsilon} \frac{(\lambda_y x)^{m+1}}{(m+1)!}, \varepsilon = k, i, j.$$

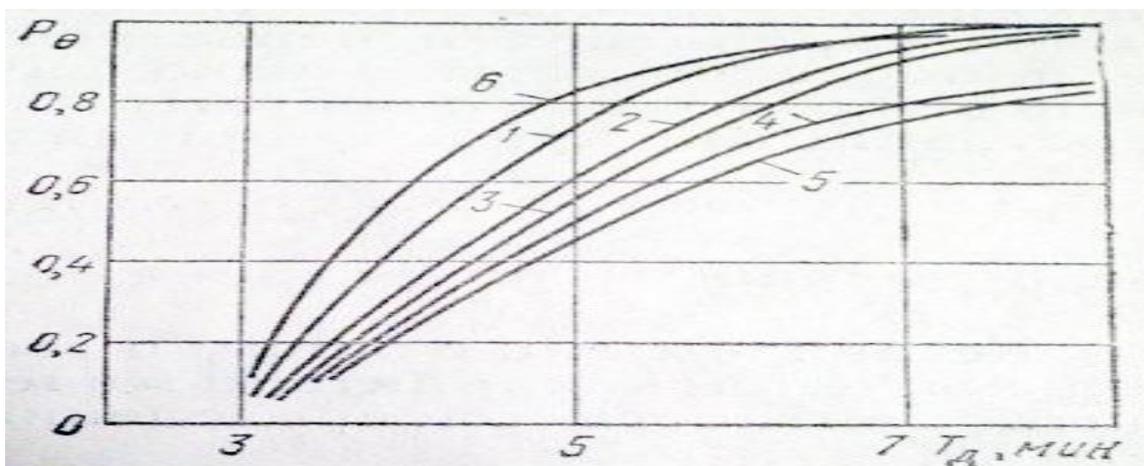
При этом суммирование для каждого ряда имеет смысл до тех пор, пока  $\tau_2(k)$ ,  $\tau_3(k)$  и  $\tau_4(k, i)$  остаются положительными, полагая, что  $\tau_1 > 0$ , а для всех сумм с верхним пределом типа  $(b-1)$  выполняется условие

$$\sum_{a=1}^{b-1} x_a = \begin{cases} 0, & b = 1, \\ \sum_{a=1}^{b-1} x_a, & b > 1, a = i, j; b = k, i. \end{cases}$$

Ввиду того, что минимальная длительность отказа равна, согласно (8), времени смены частоты в группе частот, верхний предел первой суммы в (9) можно заменить на конкретное число  $m = \lfloor (T_d - T_\theta)/t_2 \rfloor$ , где  $[x]$  – целая часть  $x$ .

Полученное соотношение (9) позволяет вычислять значение величины вероятности своевременной передачи сообщений по радиоканалу с различными типами отказов, выполняющей, в данном случае, роль критерия оценки эффективности радиолинии. На основании этой математиче-

ской модели в [3] получены графики зависимости  $P_\theta$  от  $T_\theta$  при различных значениях других переменных в (10), представленные на рис. 3. Используя эти графики, можно задать обоснованные требования к временным характеристикам автоматизированной радиопередачи исходя из времени пребывания сообщения в системе  $T_d$ , необходимой вероятности своевременной его передачи  $P_\theta$  и параметров радиоканала.



**Рис. 3.** Зависимость вероятности своевременной передачи  $P_\theta$  от времени пребывания сообщения в системе  $T_d$  при различных значениях параметров радиоканала

Например, из анализа этих кривых, видно, что при  $T_\theta = 3$  мин.,  $\lambda_y = 1$  мин<sup>-1</sup>,  $\lambda_n = 0,33$  мин<sup>-1</sup>,  $a_2 = 0,6$ ;  $a_3 = 0,3$ ;  $a_4 = 0,1$  и  $T_d = 7$  мин. вероятность своевременной передачи сообщения  $P_\theta$  оказывается не хуже 0,95 лишь при времени смены частот радиопередачи  $t_2 \leq 0,25 \dots 0,5$  мин. и времени замены группы частот  $t_3 \leq 1$  мин. (кривые 1-3). Аналогичные выводы можно сделать и при вариации других исходных данных (10): увеличении времени вхождения в связь (кривые 4 и 5), изменении параметров помеховой обстановки (кривая 6).

Соотношение (9) можно значительно упростить в некоторых частных случаях. Так, при осуществлении передачи сообщений в условиях малой интенсивности случайных помех, можно приближенно полагать, что  $a_2 = 1$ ,  $a_3 = a_4 = 0$ . Тогда (9) будет иметь вид:

$$P_\theta = e^{-\lambda_n T_\theta} \left\{ F_{t_y}(T_d - T_\theta) + \sum_{k=1}^m \frac{(\lambda_n T_\theta)^k}{k!} F_{t_y}(T_d - T_\theta - kt_2) \right\} \quad (10)$$

Однако, предложенный случай следует рассматривать как вырожденный.

Гораздо большую общность, а значит и соответствующий интерес представляет осуществление процесса передачи сообщений, с использованием автоматизированной радиопередачи, как со сменами частот в группе, так и со сменами групп частот при более тяжелых условиях функциониро-

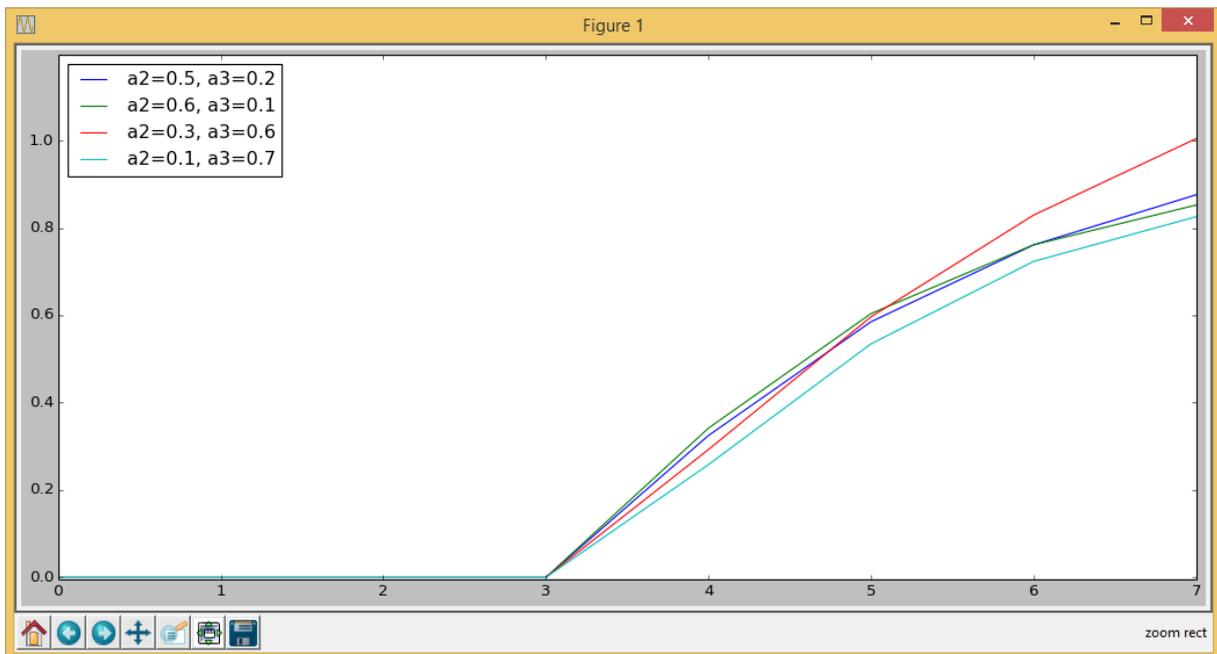
вания (наличие случайных или преднамеренных помех) ( $a_3 \neq 0$ ). В этом случае для определения вероятности своевременной передачи сообщений объема  $\theta$  можно воспользоваться выражением

$$P_\theta = e^{-\lambda_n T_\theta} \left\{ F_{t_y}(T_d - T_\theta) + \sum_{k=1}^m \frac{(\lambda_n T_\theta)^k}{k!} \left\{ a_2^k F_{t_y}(T_d - T_\theta - kt_2) + a_3^k F_{t_y}(T_d - T_\theta - kt_3) \right\} + \sum_{i=1}^{k-1} C_k^i a_2^{k-i} a_3^i F_{t_y}(T_d - T_\theta - (k-i)t_2 - it_3) \right\} \quad (11)$$

Полученные аналитические выражения позволяют оценить зависимость своевременности связи от параметров, определяющих свойства совокупности отказов, имеющих место в декаметровом канале передачи информации.

Для случая (11) был проведён средствами языка Python с подключением библиотеки `matplotlib` для отрисовки графиков. Результаты эксперимента приведены на (рис. 4). Варьировались следующие параметры:

- вероятность  $a_2$  смены частоты в группе за случайное время  $t_2$ .
- вероятность  $a_3$  переход на другую группу частот в течение случайного времени  $t_3$ .



**Рис. 4.** Результаты моделирования (зависимость вероятности своевременной передачи  $P_\theta$  от времени пребывания сообщения в системе  $T_d$ )

Сравнение графиков на рис.3 и рис.4 позволяет утверждать, что более простое (по сравнению с (9)) приближение (11) позволяет получать достаточно точные приближения зависимостей вероятности своевремен-

ной передачи сообщения  $P_\theta$  от  $T_d$  – допустимого времени пребывания сообщения в системе связи.

#### Список литературы

1. *Комарович В. Ф., Сосунов В. Н.* Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977.
2. *Алтарев В. П., Шакун Г. И., Трофимов П. И.* Процессы отказов и восстановлений в системах ПД. – М.: Связь, 1977.
3. Оценка эффективности радиолинии с отказами канала связи // *Е. В. Лебединский, А. П. Седельников*/Радиотехника. – 1987, № 8, с.5 – 7.

УДК 621.391

**Шевцов Александр Васильевич,**  
*доцент кафедры АСИБ, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
**Просьянников Александр Алексеевич,**  
*студент 5-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
**Чернышенко Михаил Дмитриевич,**  
*студент 5-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В настоящее время одним из наиболее широко распространенных средств исследования и оптимизации функционирования систем управления (и вообще любых сложных социально-технических систем) является имитационное моделирование. На такой модели можно отрабатывать воздействия различных факторов, влияющих на поведение системы, изучать зависимость эффективности её функционирования от изменения внутренних параметров и так далее.

Исследование систем и процессов методом имитационного моделирования основано на определении происходящих в системе характерных событий, а для его облегчения их выделения целесообразно первоначально графически задать процесс функционирования системы. Поведение требования в моделируемой системе не является независимым, оно обуславливается событиями с участием других требований. Сам же процесс имитации должен отображать хронологию событий в последовательности, имеющей место в реальном процессе.

В качестве объекта исследования на основе построения имитационной модели в данной работе рассматривается магистраль передачи данных, состоящую из двух каналов (основного и резервного) и общего накопителя. Целью моделирования является изучение функционирования системы, а именно оценивание ее характеристик с точки зрения эффективности работы системы.

В качестве математического аппарата для формализации описания такой системы можно использовать системы массового обслуживания (СМО), марковские цепи, сети Петри, и даже факторный анализ или планирование эксперимента, а также смешанные модели.

Предлагаемая к рассмотрению система является типичной системой массового обслуживания (СМО). Имитационная модель СМО представляет собой алгоритм, отражающий изменения состояния СМО во времени при различных типах потоков и интенсивностях поступления заявок на входы, при вариациях параметров обслуживающих аппаратов, при различных дисциплинах обслуживания заявок; анализировать характеристики модели, а также проводить структурный, алгоритмический и параметрический синтез модели при заданных критериях оценки эффективности и ограничениях.

Необходимо определить, будет ли система простаивать, загрузку основного и резервного каналов, количество прерванных сообщений, сообщений обработанных основным каналом и/или резервным каналом.

В данной работе построение и исследование модели СМО с непрерывным временем обработки параметров при наличии случайных факторов, производится в пакете AnyLogic [1], сочетающем в себе мощный инструмент объектно-ориентированного моделирования с интерфейсом визуального программирования. Простой графический язык моделирования оперирует понятиями объектов и связей между ними. AnyLogic позволяет легко и быстро создавать агентные модели на профессиональном уровне, благодаря языковым конструкциям для задания поведения агентов, их взаимодействия, моделирования среды, а также богатейшим анимационным возможностям.

При разработке моделей в AnyLogic можно использовать концепции и средства из нескольких методов моделирования, например, в агентной модели использовать методы системной динамики для представления изменений состояния среды или в непрерывной модели динамической системы учесть дискретные события [2].

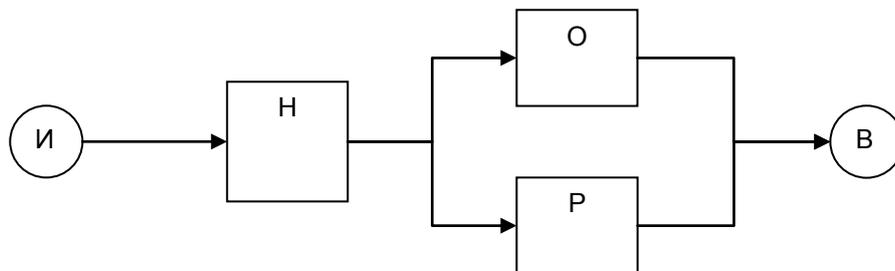
Таким образом, имитационная модель складывается, в основном, из моделирования потоков заявок и совокупности обслуживающих каналов, для чего необходимо задать их характеристики по отдельным каналам.

Входные переменные предлагаемой модели задаются интервалом времени (интенсивностью) поступления сообщений на обработку:  $T_{\Pi} \pm \Delta T_{\Pi}$ . При  $T_{\Pi} < T$ , где  $T$  – времени передачи сообщений, то загрузка системы в целом будет возрастать.

Выходными переменными модели служат: общее количество переданных сообщений по обоим каналам; количество переданных сообщений по основному каналу; количество переданных сообщений по резервному каналу; количество прерванных сообщений.

На рис.1, в виде структурной схемы, представлена концептуальная модель исследуемой системы.

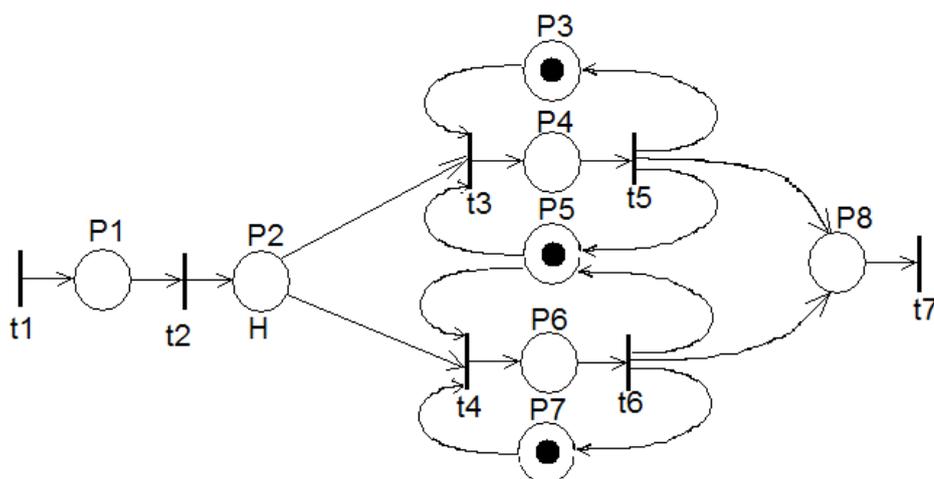
Система состоит из двух каналов: основного(О) и резервного (Р), источника (И) и общего накопителя (Н). Из источника задания, поступающие на обработку, сохраняются в накопителе и передаются по основному каналу. В случае сбоя во время передачи запускается резервный канал, который передает прерванное сообщение с самого начала. После восстановления резервный канал выключается, а основной канал продолжает работу с очередного сообщения.



**Рис.1.** Концептуальная модель в виде структурной схемы

В ходе разработки модели необходимо создать Q-схему, которая описывающую процесс функционирования СМО, набор правил поведения заявок в различных ситуациях. Определить количество каналов и накопителей, ёмкость накопителей.

Для моделирования динамических дискретных систем или асинхронных параллельных процессов удобен математический аппарат сетей Петри. Выполнения событийной модели в сетях Петри описывает поведение системы. Анализ результатов выполнения может сказать о том, в каких состояниях пребывала или не пребывала система, какие состояния в принципе не достижимы. Рассматриваемая система представлена схемой рис. 2.



**Рис. 2.** Сеть Петри модели

Позиции схемы:

- P<sub>1</sub> – заявка с потока получена;

- $P_2$  – заявка отправлена в накопитель;
- $P_3$  – основной канал послал управляющий сигнал;
- $P_4$  – срабатывает основной канал;
- $P_5$  – канал послал управляющий сигнал;
- $P_6$  – срабатывает резервный канал;
- $P_7$  – резервный канал послал управляющий сигнал;
- $P_8$  – обработка заявки завершена.

Переходы:

- $t_1$  – поступление заявки от источника;
- $t_2$  – фиксирование заявки;
- $t_3$  – передача заявки на основной канал;
- $t_4$  – передача заявки на резервный канал;
- $t_5$  – передача обработанной заявки с основного канала на выход;
- $t_6$  – передача обработанной заявки с резервного канала на выход;
- $t_7$  – обработка заявки окончена.

После генерации все сообщения поступают в накопитель, где ожидают освобождения канала передачи. Если канал свободен, то сообщение начинает передаваться. При этом в буфере основного канала сохраняется копия сообщения. Если передача произошла, то копия сообщения удаляется. При выходе из строя основного канала во время передачи сообщения, копия сообщения из буфера поступает на резервный канал и передается с самого начала. Передача сообщений по резервному каналу происходит до восстановления основного канала. После восстановления основного канала сообщения передаются через основной канал, а резервный канал отключается.

Моделируемая система может быть также представлена М-цепью (рис.3)

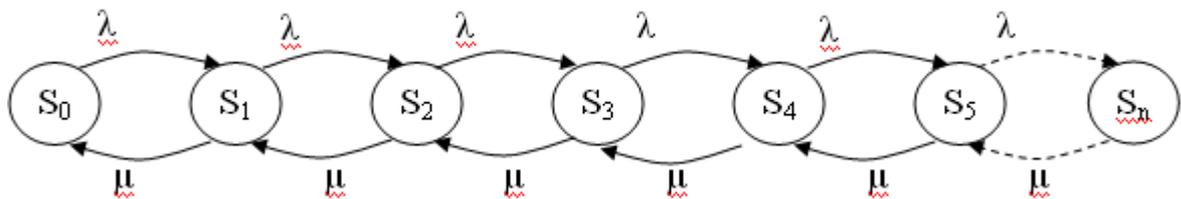


Рис. 3. Граф состояний системы

На рисунке 3 отмечены:

- $S_0$  – система свободна;
- $S_1$  – накопитель занят, канал занят;
- $S_2$  – канал занят, одна заявка в очереди;
- $S_m$  – канал занят,  $m$ -заявок в очереди;
- $S_{m+1}$  – очередь заполнена, одна заявка под обслуживанием.

На рис.4 для алгоритмизации и машинной реализации модели системы представлена её логическая схема.

При моделировании можно использовать различные инструментальные средства, а возможность смешивать подходы позволяет

описывать реальные процессы, а не подгонять их под доступный математический аппарат.

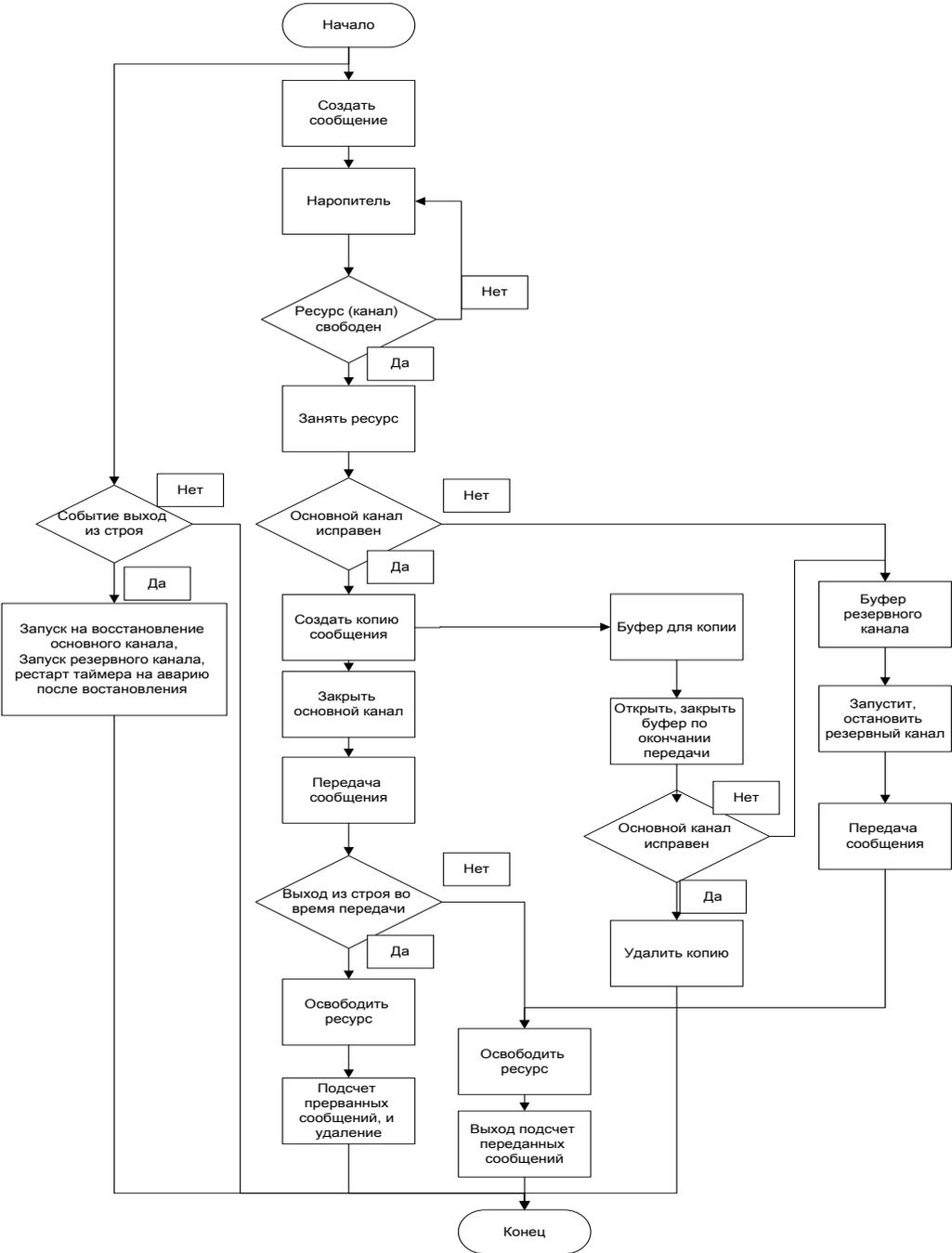


Рис. 4. Логическая схема системы

Для построения схемы программы необходимо осуществить спецификацию. Система характеризуется следующими параметрами: при нормальной работе сообщения передаются по основному каналу за  $7 \pm 3$  с., причём сбои в нём происходят через интервалы времени  $200 \pm 35$  с.; если сбой происходит во время передачи, то за 2 с запускается запасной канал, который передает прерванное сообщение с самого начала; восстановление

основного канала занимает  $23 \pm 7$  с. и после его восстановления выключается резервный канал и основной канал продолжает работу с очередного сообщения; сообщения поступают через  $9 \pm 4$  с и остаются в накопителе до окончания передачи; в случае сбоя передаваемое сообщение передается повторно по запасному каналу. Моделируется работа магистрали передачи данных в течение 10 ч. с определением число переданных сообщений по обоим каналам, загрузку запасного канала, частоту отказов канала и число прерванных сообщений.

Для определения числа переданных сообщений надо считать количество обработанных сообщений на выходе модели, а число прерванных сообщений определяется подсчётом удаленных сообщений при выходе из строя основного канала. Для определения загрузки запасного канала считается количество обработанных сообщений на выходе запасного канала, а для определения частоты отказов основного канала – количество выходов из строя основного канала.

Получение выходных данных зависит от среды моделирования. Для реализации модели канала передачи данных в пакете AnyLogic используется библиотека AnyLogic Enterprise Library [3], которая поддерживает дискретно-событийный или, более точно, "процессный" подход к моделированию.

Схема модели канала и её программное исполнение даны на рис. 5, 6.

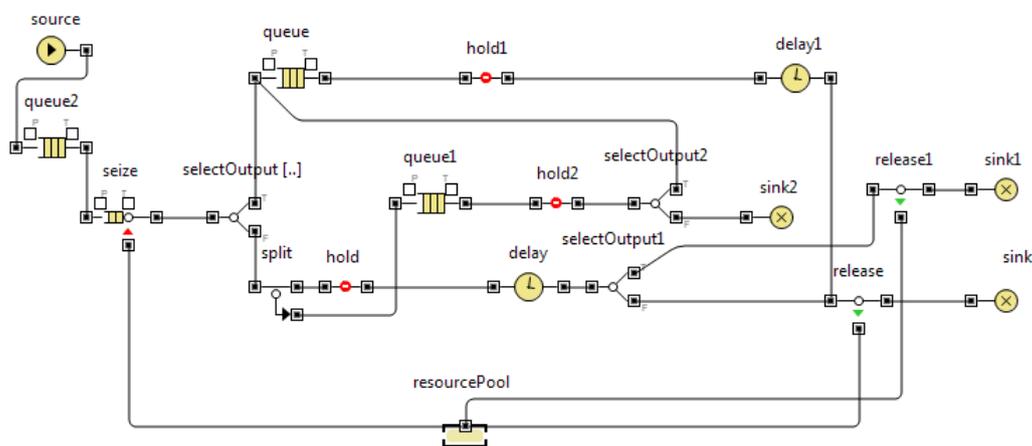
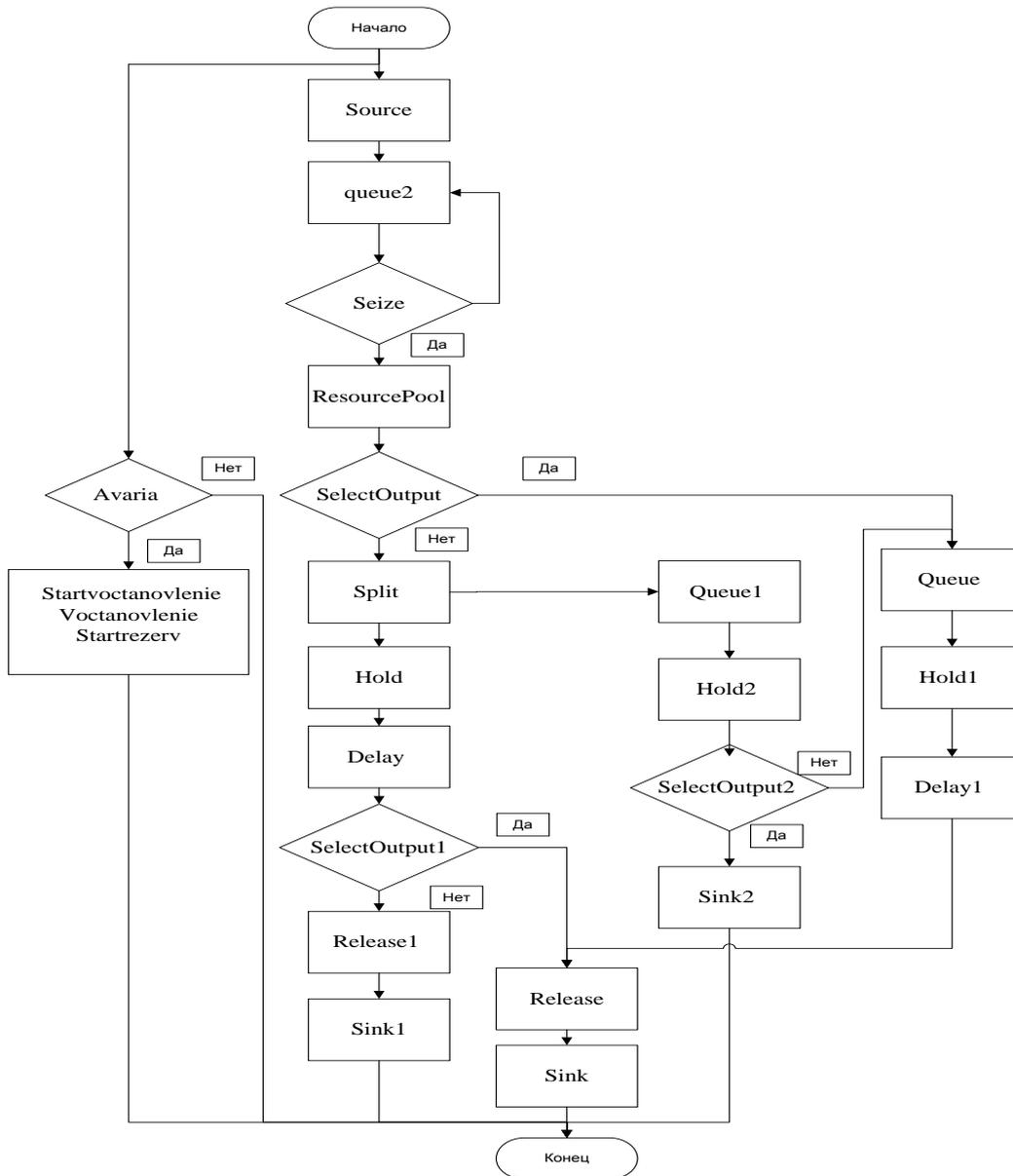


Рис. 5. Схема программной реализации модели



**Рис. 6.** Схема модели канала

Вычислительный эксперимент с моделью для получения максимального объема информации об объекте моделирования при минимальных машинных затратах можно рассматривать как полный факторный эксперимент с четырьмя существенными факторами (переменных и параметров);

- $x_1$  – интервал времени прибытия очередного сообщения = 9 с.;
- $x_2$  – интервал времени выхода из строя основного канала = 250 с.;
- $x_3$  – время передачи сообщения по каналам = 7 с.;
- $x_4$  – время восстановления основного канала = 23 с.;
- $x_5$  – время запуска резервного канала = 2 с.

Уровни вариации для каждого фактора:  $\Delta x_1=2$ ,  $\Delta x_2=50$ ,  $\Delta x_3=2$ ,  $\Delta x_4=4$ ,  $\Delta x_5=1$ . Подобный факторный эксперимент с моделью позволяет получить необходимое количество выходных данных и статистические харак-

теристик модели, при этом каждый опыт соответствует одному из возможных состояний исследуемой системы.

Таблица 1

Матрица полного факторного эксперимента

Номер опыта	Фактор $x_1$	Фактор $x_2$	Фактор $x_3$	Фактор $x_4$	Фактор $x_5$	Номер опыта	Фактор $x_1$	Фактор $x_2$	Фактор $x_3$	Фактор $x_4$	Фактор $x_5$
0 (базовый)	8	250	6	22	3	–	–	–	–	–	–
1	6	200	4	18	2	17	10	200	4	18	2
2	6	200	4	18	4	18	10	200	4	18	4
3	6	200	4	26	2	19	10	200	4	26	2
4	6	200	4	26	4	20	10	200	4	26	4
5	6	200	8	18	2	21	10	200	8	18	2
6	6	200	8	18	4	22	10	200	8	18	4
7	6	200	8	26	2	23	10	200	8	26	2
8	6	200	8	26	4	24	10	200	8	26	4
9	6	300	4	18	2	25	10	300	4	18	2
10	6	300	4	18	4	26	10	300	4	18	4
11	6	300	4	26	2	27	10	300	4	26	2
12	6	300	4	26	4	28	10	300	4	26	4
13	6	300	8	18	2	29	10	300	8	18	2
14	6	300	8	18	4	30	10	300	8	18	4
15	6	300	8	26	2	31	10	300	8	26	2
16	6	300	8	26	4	32	10	300	8	26	4

Набор исходных данных для ввода в ЭВМ представлен в виде матрицы плана (табл. 1), с помощью которой в достаточном объеме исследуется факторное пространство

Результаты модельного эксперимента представлены в таблице 2 и подтвердили следующие гипотезы для базовой точки эксперимента:

- интенсивность отказов, а именно увеличение их количества, влечёт уменьшение числа переданных сообщений, следовательно, нужно стремиться к уменьшению количества отказов, не забывая, что при этом загрузка основного канала повысится, а резервного уменьшится;

- уменьшение частоты поступления новых сообщений хотя и влечёт возрастание количества переданных сообщений, но и способствует простоям системы в ожидая поступления очередного сообщения.

## Результаты моделирования

Час- тота отка- зов	Кол-во отка- зов	Загрузка резервно- го канала %	Число пре- рванн- ых сооб- щений	Кол-во передан- ных со- общений по основ- ному ка- налу	Кол-во пе- реданных сообщений по резерв- ному кана- лу	Всего пе- реданных сообще- ний	Всего поступив- ших сооб- щений
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
276,9	26	9,3	20	820	85	905	910
232,2	31	9,5	19	1083	114	1197	1199
218,2	33	9,3	25	1105	114	1219	1219
225	32	13,1	21	1030	156	1186	1187
218,2	33	12,5	26	1032	148	1180	1181
218,2	33	14,2	20	495	82	577	1119
218,2	33	13,9	19	457	74	531	1200
225	32	12,1	31	737	102	839	1209
232,2	31	11,9	31	754	102	856	1220
327,2	22	7	16	1134	86	1220	1220
327,2	22	6,2	12	1135	74	1209	1210
342,8	21	9	12	1073	107	1180	1181
327,7	22	8	13	1084	95	1179	1180
327,2	22	8,8	15	554	54	608	1178
327,2	22	9,8	13	479	49	528	1199
327,2	22	9	21	765	76	841	1207
327,2	22	8,7	20	731	70	801	1215
218,1	33	9,9	14	666	73	739	739
211,7	33	11	14	631	78	709	710
225	32	13	14	621	93	714	714
225	32	12,6	14	624	90	714	715
218,1	33	11,5	23	590	77	667	724
225	32	13	22	515	77	592	726
232,2	31	13,2	27	630	96	726	727
225	32	13,9	30	631	102	733	734
327,2	22	6,2	6	677	45	722	722
327,2	22	6,6	13	673	48	721	721
327,2	22	9,4	12	651	68	719	719
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
327,2	22	8,9	9	654	64	718	718
327,2	22	9	15	534	53	587	720
327,2	22	7,7	15	610	51	661	719
342,8	21	9	16	653	67	720	721
342,8	21	9,9	16	599	66	665	721

Анализ таблицы результатов показывает, что рекомендуется использовать магистраль передачи данных в условиях экспериментов №№

3, 4, 11, 12, так как при этом количество переданных сообщений максимально, обработаны все поступившие сообщения.

Результаты эксперимента представлены графиком (рис.7), при анализе которого можно сделать следующие выводы:

1. График сообщений, суммарно переданных по обоим каналам, и график сообщений, переданных по основному каналу, почти идентичны, т.е. почти всю нагрузку несет основной канал. При этом количество переданных сообщений по резервному каналу возрастает при увеличении времени восстановления основного канала.

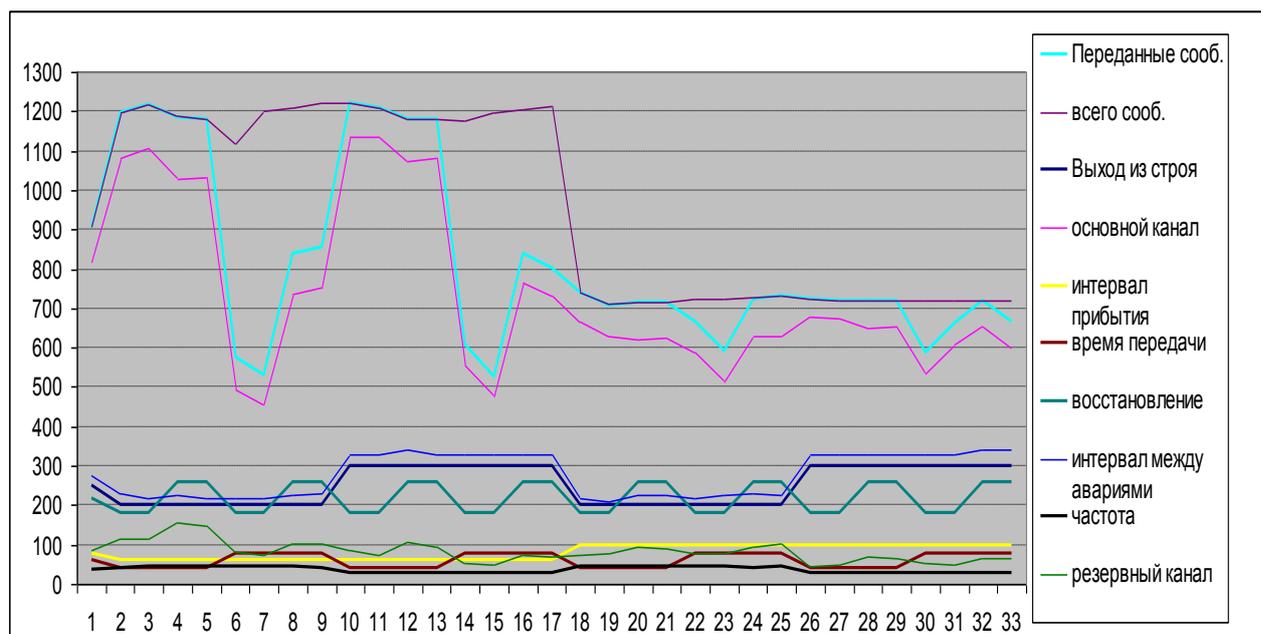


Рис. 7. Графическое представление процессов в модели системы

2. Частота отказов имеет прямую зависимость от интервала времени выхода из строя основного канала. При уменьшении времени интервала между авариями их частота возрастает.

3. Количество переданных сообщений по резервному каналу достигает максимума при максимальных значениях времени восстановления основного канала, и минимальных значениях интервала между авариями.

4. Уменьшение времени передачи даёт возрастание числа переданных сообщений, а увеличение времени передачи и уменьшения времени восстановления наблюдается самая низкая пропускная способность каналов.

5. Предыдущее замечание хорошо коррелирует с тем, что при уменьшении времени передачи и увеличении времени восстановления наблюдается самая высокая пропускная способность каналов. При этом количество прибывших сообщений равно количеству переданных сообщений по обоим каналам.

#### Список литературы

1. Осоргин А. Е. AnyLogic 6 / Лабораторный практикум. – Самара, 2011. – 100 с.
2. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5.0. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
3. Карпов Ю.Г. Изучение современных парадигм информационного моделирования в среде AnyLogic // Компьютерные инструменты в образовании. – СПб.: Изд-во ЦПО.
4. "Информатизация образования", 2005, №12, с. 03 – 14

УДК 621.391

**Шевцов Александр Васильевич,**  
*доцент кафедры АСИБ, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
**Журбенко Павел Валерьевич,**  
*студент 5-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,*  
**Хохлов Дмитрий Юрьевич,**  
*студент 5-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

### МОДЕЛИ ОШИБОК В ДИСКРЕТНЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ

Высокие требования к верности и скорости передачи информации, предъявляемые со стороны пользователей к системам передачи информации (СПИ), приводят к необходимости применения специальных мер по борьбе с ошибками в дискретных каналах связи (ДКС). Для разработки СПИ, наиболее эффективных в конкретных условиях эксплуатации, необходимо на стадии проектирования системы оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи сообщений, для чего необходимо иметь статистические данные об ошибках. В процессе эксплуатации реальных систем, к настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о статистике ошибок в реальных ДКС [1].

Для анализа характеристик процесса передачи сообщений в СПИ необходимо строить математические модели процесса возникновения ошибок в реальных ДКС, что упрощает и обеспечивает универсальность исследований характеристик процесса функционирования СПИ на этапе их проектирования.

При построении математической модели (аналитической или имитационной) необходимо исходить как из целей проводимого анализа, т. е. из того, какие характеристики процесса передачи сообщений и с какой точностью требуется определить на основе этой модели, так и из полноты и точности экспериментальной статистики, имеющейся в распоряжении проектировщика.

Усложнение модели ошибок в ДКС позволяет повысить точность получаемых результатов анализа характеристик, но эта точность должна

соответствовать точности исходных данных о статистике ошибок. Выбор сложной многопараметрической модели ошибок при невысокой точности исходных данных приведет лишь к увеличению затрат времени на анализ, но не позволит повысить точность получаемых результатов. Таким образом, при построении математической модели ошибок необходимо в каждом конкретном случае искать компромисс между точностью (результатов и исходных данных) и сложностью модели.

Наиболее простой из аналитических моделей ошибок в ДКС является модель независимых ошибок, которая строится в предположении, что ошибки в ДКС возникают независимо друг от друга. Единственным параметром этой модели ошибок является интенсивность ошибок  $p_e$ , что существенно её упрощает.

Известно большое количество аналитических моделей ошибок в ДКС, различным образом отображающих экспериментально установленный факт пакетирования ошибок [2]. По способу описания потоков ошибок их можно разделить на две большие группы.

Аналитические модели первой группы отражают чисто абстрактный подход к вопросу описания потока ошибок, но при этом механизм пакетирования ошибок в ДКС не задается в явном виде. Построение моделей в этом случае сводится к подбору функции распределения длин интервалов  $u$  между ошибками, хорошо согласующейся с соответствующей функцией распределения  $F_{\text{эксп}}$ , полученной экспериментально. К основным моделям этой группы можно отнести модели Бергера – Мандельброта, Зелигера, Аксенова – Воронина, Шварцмана и другие подобные модели [2]. Как правило, такие аналитические модели ошибок в ДКС приводят к громоздким выражениям для вычисления характеристик процесса передачи сообщений.

Аналитические модели второй группы в том или ином виде отражают механизм пакетирования ошибок, оперируя понятиями, близкими к физическим явлениям, происходящим в ДКС. В качестве математического аппарата для построения моделей этой группы используется теория восстановления, теория марковских цепей и т. д. К основным моделям этой группы можно отнести модели Гильберта, Элиота, Беннета-Фройлиха, Смита-Боуэна-Джойса, Попова, Турина, Мизина и другие подобные модели [2]. Как правило, модели этой группы дают более удобные выражения для вычисления характеристик процесса передачи сообщений, но возникают трудности определения параметров моделей на основе экспериментальных данных.

Практика эксплуатации СПИ показывает, что пакеты ошибок возникают под действием множества источников возмущений, порождаемых случайными началом, длительностью и степенью воздействия на передаваемый сигнал. Все последствия этих причин суммируются, что позволяет, исходя из физических предпосылок, рассматривать функцию распределения длин интервалов между ошибками как сумму экспонент, каждая из которых характеризует распределение длин интервалов между ошибками од-

ной группы причин. Это дает возможность провести аппроксимацию экспериментальной функции распределения длин интервалов между ошибками распределением

$$F_{\text{эксп}}(u) = \sum_{i=1}^{K_B} A_{\text{эксп } i} \exp(-\varphi_{\text{эксп } i} u), \quad (1.1)$$

где  $A_{\text{эксп } i}$  и  $\varphi_{\text{эксп } i}$ ,  $i = 1 \div K_B$  – параметры экспериментальной модели. Функция (1.1) позволяет практически описать все имеющиеся функции распределения длин интервалов между ошибками, полученные экспериментально для стационарных ДКС, применяемых в СПИ. Но получение  $2K_B - 1$  параметров функции распределения (1.1) из экспериментальных данных при больших  $K_B$  сложно.

Обычно используемые в СПИ каналы связи с ошибками, в основном, из-за кратковременных перерывов и импульсных помех, а главный интерес представляют сообщения с длиной интервалов между ошибками не более  $10^4$  элементов, позволяет от распределения (1.1) перейти к

$$F_{\text{эксп}}(u) = A_1 \exp(-\varphi_1 u) + (1 - A_1) \exp(-\varphi_2 u), \quad (1.2)$$

для которого на основе экспериментальной статистики ошибок в ДКС СПИ достаточно просто определяются три параметра.

Исследование вероятностно-временных характеристик процесса передачи сообщений аналитическим методом с использованием этой модели довольно трудоёмко из-за сложности получаемых выражений. Избежать этого можно, переходя от этой исходной экспериментальной модели к модели двоичного симметричного канала с памятью (ДСКП) [3]. Связь модели ДСКП с результатами от экспериментальной статистики ошибок, задаёт функция распределения длин интервалов между ошибками  $F(u)$ . При попадании пакета ошибок на кодовую комбинацию сообщения внутри участка наложения возможны два случая: элемент кода искажён или не искажен. Поэтому состояние 1 (когда возникают независимые ошибки с вероятностью  $1 - h$ ) модели Гильберта для ДСКП, можно разбить на два состояния: правильного приема элемента 1' и ошибки 1''. Такая модель ДСКП полностью определяется матрицей переходных вероятностей

$$Q^* = \|q_{i,j}^*\| = \begin{vmatrix} q_{00} & q_{01}h & q_{01}(1-h) \\ q_{10} & q_{11}h & q_{11}(1-h) \\ q_{10} & q_{11}h & q_{11}(1-h) \end{vmatrix}.$$

Соответствующий вероятностный граф показан на рис.1.

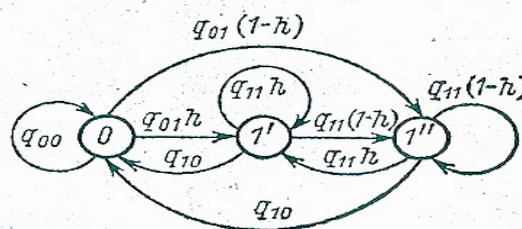


Рис. 1. Вероятностный граф

Тогда можно показать, что функция распределения длин интервалов между ошибками будет

$$F(u) = A\varepsilon_1^u + (1 - A)\varepsilon_2^u, \quad (1.3)$$

где  $\varepsilon_{1,2} = \frac{(q_{00} + hq_{11} \pm \sqrt{(q_{00} + hq_{11})^2 + 4h(q_{10} - q_{00})})}{2}$ ,  $A = \frac{\varepsilon_1 + q_{10} - q_{00}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$ .

Таким образом, функция распределения длин интервалов между ошибками является суммой двух геометрических прогрессий, из которых первая прогрессия в выражении (1.3) отражает распределение длин интервалов между пакетами ошибок, а вторая определяет вероятность появления «плохих» и «хороших» состояний внутри пакета ошибок. Параметры модели ДСКП (1.3) связаны с параметрами экспериментальной модели (1.2) следующими соотношениями:  $A_1 = A$ ,  $\varphi_1 = -\ln \varepsilon_1$ ,  $\varphi_2 = -\ln \varepsilon_2$ . Если имеется экспериментальная статистика об ошибках в ДКС, представленная в виде функций распределения длин интервалов между ошибками  $F_{\text{эксп}}(u)$ , параметры модели  $A_1, \varphi_1, \varphi_2$  могут быть легко получены непосредственно из экспериментальных данных, что позволяет также определить вероятности  $h, q_{01}$  и  $q_{10}$ , полностью определяющие модель ДСКП. Модель ДСКП дает возможность на основе имеющейся статистики описать потоки ошибок в дискретных каналах связи, используемых в СПИ, в том числе и для каналов нижнего уровня (абонентских каналов), для которых модель ДСКП упрощается до модели независимых ошибок в ДСК без памяти, для которого  $q_{00} = q_{10}$  и  $q_{01} = q_{11}$  при любых  $h$ . Функция распределения длин интервалов между ошибками для ДСК без памяти

$$F(u) = (1 - p_3)^u p_3,$$

где единственный параметр  $p_3$  – величина вероятности ошибочного приема элемента кодовой комбинации сообщения для канала с независимыми ошибками, которую можно определить как  $p_3 = \tau f_{\text{сп}}$ , где  $f_{\text{сп}}$  – средняя частота помехи,  $\tau = n/B$  длительность элемента кодовой комбинации сообщения.

Основная сложность использования рассмотренной аналитической модели ДСКП (1.3) для анализе вероятностно-временных характеристик процесса передачи сообщений в СПИ состоит в необходимости получения функции распределения  $P(j, n)$  числа ошибок  $j$ , попавших на кодовую комбинацию сообщения длиной  $n$  элементов.

Функция  $P(j, n)$  может быть получена на основе рекуррентных соотношений [4] или по формуле

$$P(j, n) = (1 - h)^j \times \sum_{i=j}^n \binom{j}{i} Q(i, n),$$

где  $Q(i, n)$  – вероятность появления  $i$  «плохих» состояний в кодовой комбинации сообщения из  $n$  элементов. Для определения  $Q(i, n)$  необходимо использовать аппарат производящих функций.

В обоих случаях проведение практических расчётов  $P(j, n)$  для больших длин кодовых комбинаций  $n$  довольно затруднительно.

В [4] рассмотрен способ приближенной оценки вероятности появления в кодовой комбинации сообщения длиной  $n$  элементов  $j$  и более ошибок:

$$P(\geq j, n) = \sum_{i=j}^n P(i, n)$$

и для каналов связи, используемых на верхнем уровне СПИ, можно записать:

$$P(\geq j, n) \approx P(\geq 1, n) \prod_{i=2}^j \frac{(i-1)(n^{\beta-1} - (i-1)^{\beta-1})}{(i-1)n^{\beta-1} - i^{\beta}}, \quad (1.4)$$

где  $P(\geq 1, n) = p_3 \left[ A \frac{1-\varepsilon_1^n}{1-\varepsilon_1} + (1-A) \frac{1-\varepsilon_2^n}{1-\varepsilon_2} \right]$ ,  $\beta = \frac{\ln P(\geq 1, n) - \ln p_3}{\ln n}$ .

Однако такая аппроксимация применима лишь для каналов с ярко выраженным пакетированием ошибок и совсем непригодна для каналов с независимыми ошибками

Приведённые соотношения (1.3), (1.4) задают математическую аналитическую модель статистики ошибок в ДСК. Построенная модель источника ошибок и вычисление на ее основе вероятностей  $P(j, n)$  позволяет провести анализ вероятностно-временных характеристик процесса передачи сообщений в СПИ.

Показано [3]: для каналов верхней ступени СПИ, справедливы следующие пределы вероятностей:

$$h = 0,3 \div 0,7, q_{01} = 10^{-5} \div 10^{-3}, q_{10} = 0,05 \div 0,30.$$

Расчеты на основе приближенного выражения (1.4) для кодовых комбинаций длиной от 31 до 1023 элементов дали значения параметров модели ДСКП в диапазонах  $h = 0,55 \div 0,70$ ,  $q_{01} = 10^{-5} \div 10^{-3}$ ,  $q_{10} = 0,05 \div 0,30$  и показали приемлемость использования соотношения (1.4) в инженерных расчетах.

Однако, для кодовых комбинаций большой длины, содержащих  $\sim 10^2 - 10^3$  элементов, аналитические расчёты на основе предложенной модели громоздки и более рационально провести определение функции распределения  $P(j, n)$  на основе имитационной модели.

Например, при имитации последовательности независимых ошибок (т. е. простейшей модели ошибок в ДКС), задаваемой функцией плотности вероятности  $f(u) = p_3 \exp(-p_3 u)$ ,  $u > 0$ , получаем

$$p_3 \int_0^{u_i} \exp(-p_3 u) du = 1 - \exp(-p_3 u) = z_i,$$

где  $z_i$  – число, принадлежащее последовательности случайных чисел, равномерно распределенных в интервале  $[0,1]$ . Решим это уравнение относи-

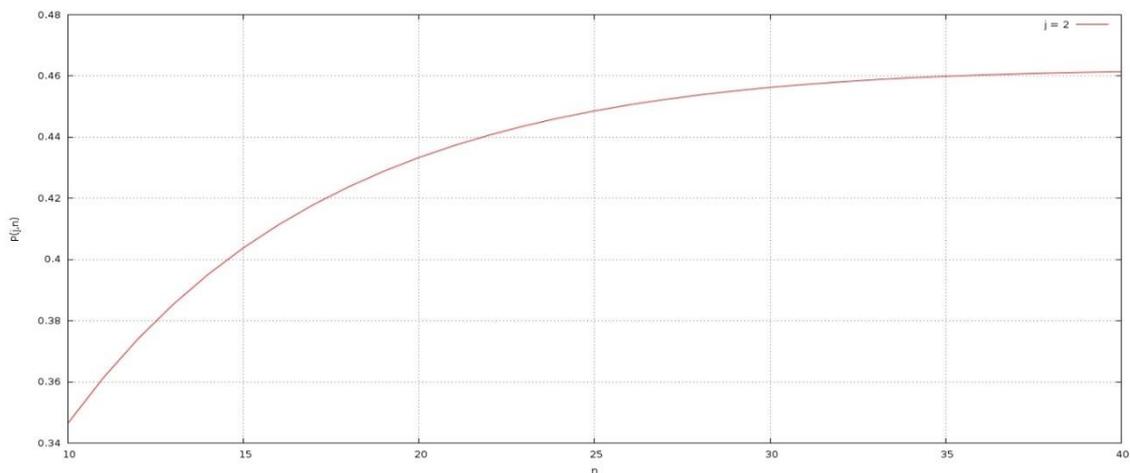
тельно  $u_i$ :  $u_i = -(1/p_3) \ln(1 - z_i) = -(1/p_3) \ln z_i$ . Это равенство справедливо так как случайное число  $z_i = 1 - z_i$  также принадлежит последовательности случайных чисел с равномерным распределением на  $[0, 1]$ . Таким образом, полученная последовательность случайных чисел  $\{u_i\}$  будет имитировать процесс появления независимых ошибок в дискретном канале связи.

Применение имитационного моделирования позволяет оценить  $P(j, n)$  не только при сложности их расчётов на основе аналитической модели ошибок, но и тогда, когда исходная экспериментальная статистика ошибок не аппроксимируется пригодной для инженерных расчётов аналитической моделью.

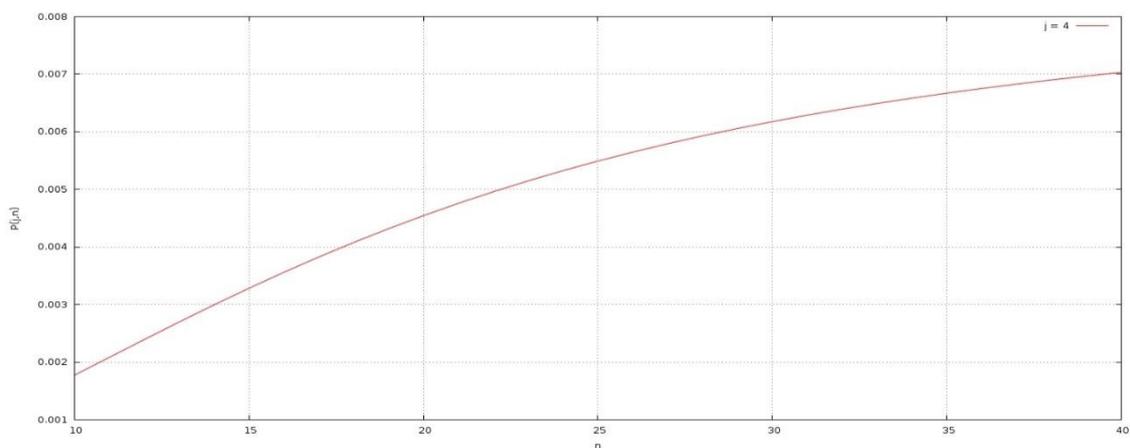
В данной работе вычислительные эксперименты проводились средствами языка Ruby. Результаты, полученные в ходе эксперимента, представлены графиками на рис. 2 – 5.

При этом:

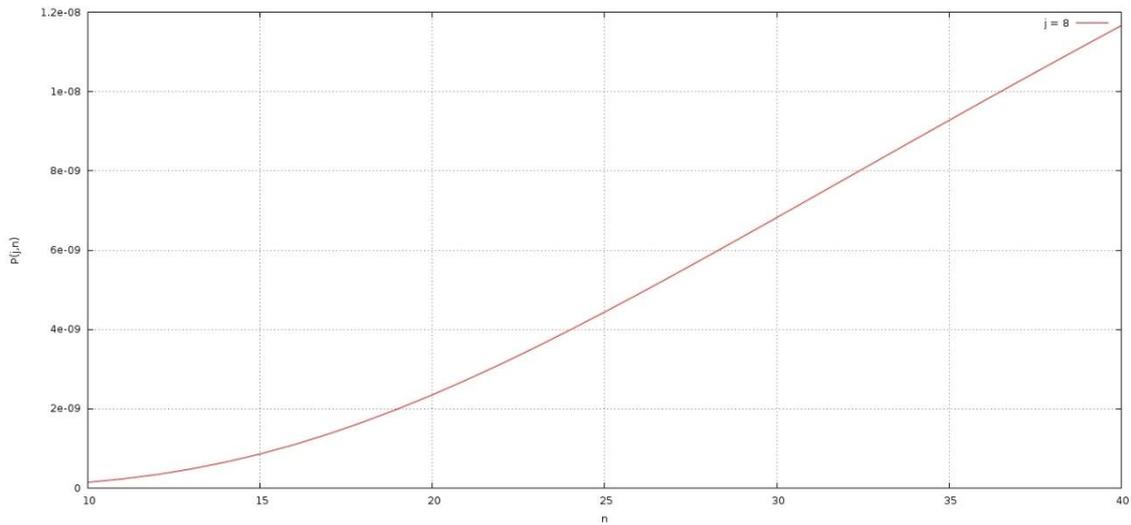
- изменяемый параметр – число ошибок  $j$  (2, 4, 8, 10);
- кодовая комбинация сообщения длиной 10-40 элементов.



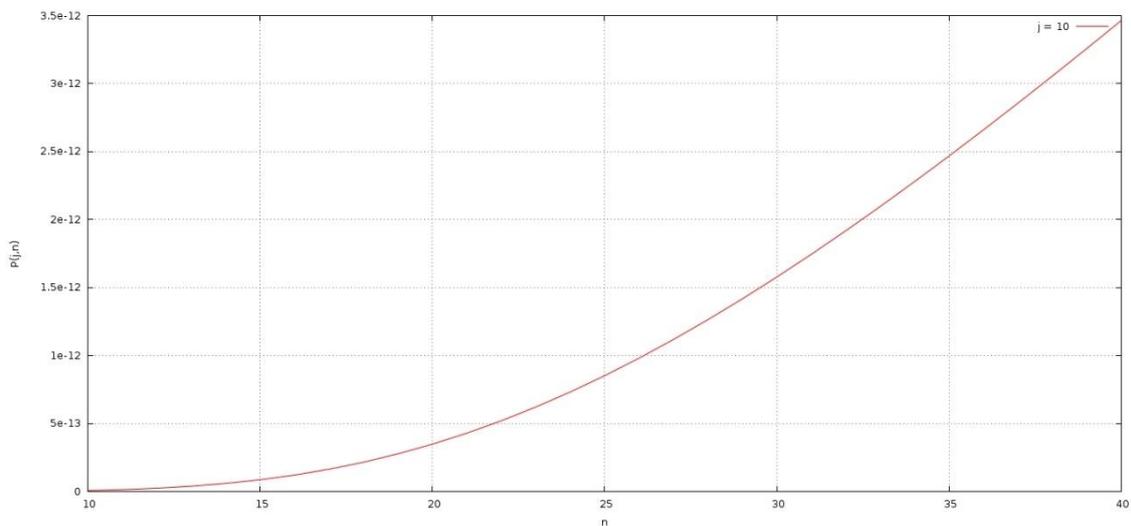
**Рис. 2.** Вероятность появления ошибок  $P(j, n)$  при  $j=2$



**Рис. 3.** Вероятность появления ошибок  $P(j, n)$  при  $j=4$



**Рис. 4.** Вероятность появления ошибок  $P(j,n)$  при  $j=8$



**Рис. 5.** Вероятность появления ошибок  $P(j,n)$  при  $j=10$

Из графиков видно, что вероятность  $P(j,n)$  заметно уменьшается с ростом  $j$  при фиксированном  $n$ . При  $j > 5$  распределение  $P(j,n)$  имеет более экспоненциальный характер при фиксированном  $n$ , однако известно [4], что с ростом длины кодовой комбинации поведения распределения становится таким же, как и при малых  $j$ . Расчёты показали хорошее соответствие с результатами, полученными на основе аналитической модели.

#### Список литературы.

1. Передача дискретных сообщений по каналам с группирующимися ошибками [Текст] / Под ред. Э. Л. Блоха. – М. Наука, 1972. – 148 с.
2. Блох Э. Л. Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации [Текст] / Э. Л. Блох, О. В. Попов, В. Я. Турин. – М. Связь, 1976. – 312 с.
3. Турин В. Я. Передача информации по каналам с памятью [Текст]. – М. Связь, 1977. – 248 с.
4. Искан В. Я. Математические модели для оценки качества передачи сообщений в каналах с замираниями и помехами [Текст] / Препринт. – Новосибирск. ВЦ СО АН СССР, 1990. – 48 с.

*Штаев Денис Викторович,*  
*аспирант 3-го курса, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*  
*Рынгачев Юрий Степанович,*  
*аспирант 2-го года обучения, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*  
*Павликов Сергей Николаевич,*  
*к.т.н., зав. кафедры РЭС, профессор, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ**

Северный морской путь (СМП) недостаточно оснащен радиоэлектронными средствами (РЭС) для безопасной жизнедеятельности.

Несмотря на высокий уровень конструктивной безопасности морских судов, насыщение их надёжными средствами судовождения и связи, и другие меры, морские катастрофы с человеческими жертвами продолжают. Объект исследования: данные о действующих и проектных РЭС обеспечения безопасности на трассах Северного морского пути. Предмет исследования: эффективность и целесообразность данных РЭС как комплекса средств связи, обеспечивающих безопасность мореплавания по СМП.

Цель: анализ обеспеченности радиоэлектронными средствами СМП, выявление «слабых мест». Актуальность: СМП – экономически выгодная трасса из Тихого океана в Атлантический как для отечественных, так и иностранных судов и для сокращения времени пути между регионами РФ.

Анализ объекта. Судьба СМП в значительной степени зависит от разработки разведанных в его зоне минеральных ресурсов. В качестве потенциальных клиентов СМП могут оказаться: Лицензиаты уникального Штокмановского месторождения нефти и газа с запасами свыше трёх триллионов кубометров газа, Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции с месторождениями: Приразломным, северо-онежских бокситов, полиметаллов и марганца на архипелаге Новая Земля, в случае экспорта в страны Юго-Восточной Азии. Газ Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения, планируется экспортировать из порта Сабетта, расположенного на п-ове Ямал [1]. Вывести новый завод на полную мощность планируется в 2018 году. Специально для этого планируется создать танкерный флот ледокольного класса примерно на 20 судов вместимостью 140—160 тыс. кубометров, чтобы обеспечить вывоз углеводородов с Ямала [1 -3]. До 60 % грузооборота российского побережья Арктики приходится на Мурманский и Архангельский порты. Интерес к развитию СМП имеет крупнейший порт Гудзонова залива – Черчилл, через который производится вывоз пшеницы из канадских провинций Манитоба и Саскачеван через Гудзонов пролив в Европу, а с 2007 года поддерживающий связь

и с Мурманском. Также большое значение в данном районе имеют многочисленные мелкие порты Норвегии, Гренландии и на Дальнем Востоке России. Длина Северного морского пути от Карских Ворот до бухты Провидения – около 5600 км. Именно через этот сложный с точки зрения обеспеченности радиоэлектронными средствами обеспечения безопасной навигации путь пролегает самый привлекательный альтернативный маршрут для одного из самых объемных мировых грузопотоков из Северной Европы в Восточную Азию. Кроме ограниченного перечня перевалочных пунктов и малой обеспеченности РЭС связи на СМП на выбор южного пути оказывают влияние высокий уровень рисков, связанные с суровым климатом. По той же причине для РЭС СМП предъявляются более высокие требования [1].

Существует разделение на морские районы плавания судов по радиодоступу на четыре категории: А1 – район, находящийся в зоне действия одной и более береговых УКВ-станций, обеспечивающей постоянную возможность передачи сообщений с использованием цифрового избирательного вызова (20-50 миль). А2 – район, за пределами района А1, в зоне действия по крайней мере одной береговой радиостанции, работающей в ПВ-диапазоне и обеспечивающей постоянную возможность передачи сообщений о бедствии с использованием ЦИВ (около 150 миль). А3 – район в пределах зоны действия системы геостационарных спутников INMARSAT, обеспечивающих постоянную возможность оповещения о бедствии (примерно между 70 градусом северной широты и 70 градусом южной широты). А4 – район, выходящий за пределы морских районов А1, А2, А3.

Большая часть СМП относится к морскому району плавания класса А4 обеспеченному минимумом возможных средств связи. Навигация и гидрография СМП

Одно из важных требований к навигационным гидрографическим средствам - обеспечение возможности создания цифровой модели рельефа и грунта дна, береговой черты, навигационных опасностей в виде электронной карты. Цифровая электронная карта должна учитывать он-лайн мониторинг движения водных объектов. На данный момент эту задачу решает ЕСИМО – единая система информации о мировом океане – портал с интерактивной электронной картой (свыше 3500 слоев). Одна из ее систем - система мониторинга опасных ледяных образований (далее – ОЛО), т.е. айсбергов, осуществлена на базе комплекса спутниковых радиолокаторов, позволяющих вести съемку в любых условиях облачности в многополяризационном режиме и обеспечивать получение информации в любой полосе обзора (от нескольких км до 150 км). Технология оперативного прогнозирования распространения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на море осуществляется на базе программного комплекса SPILLMOD. Этот комплекс, разработанный в ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова» Росгидромета, установлен в Северном УГМС и внедрен в 2012 г. в практику [4, 5]. Энергетическую проблему пунктов СМП могут решить плавучие атомные теплоэлектростанции (ПАТЭС).

ПАТЭС представляет собой специфический вид мобильного энергоисточника малой мощности, предназначенного для автономного снабжения электрической и тепловой энергией потребителей в изолированных районах со сложными транспортными условиями [3].

ГМССБ – глобальная морская система связи при бедствиях, целью которой является обеспечение безопасности мореплавания. Осуществляет передачу информации о бедствии (аварии) ближайшим судам и спасательным координационным центрам (СКЦ). В Дальневосточном регионе таковым является Владивостокский спасательно-координационный центр и его подцентры, находящиеся в Южно-Сахалинске и Петропавловске-Камчатском. ГМССБ – это комплекс средств связи, обеспечивающий передачу аварийных сигналов независимо от района плавания судна в трех направлениях: «судно-берег», «судно-судно» (будет эффективным на расстоянии не более 100 миль), «берег-судно» (если спутниковая, то INMARSAT). Для передачи сигналов определения местоположения судна терпящего бедствие используются радиомаяки-ответчики, радиобуи. Для передачи навигационных данных и метеорологических предупреждений применяются системы NAVTEX и «СафетиНет». Обмен навигационной информацией от судна к судну производится по УКВ радиотелефону на частоте 156.65 МГц (13 канал). Цифровой избирательный вызов (ЦИВ или DSC – Digital Selective Calling) – это всемирно принятая система общего назначения для избирательного вызова. Система используется в УКВ/ПВ/КВ-диапазонах на специально выделенных частотах. Международная спутниковая система КОСПАС-SARSAT является одной из основных частей ГМССБ и предназначена для обнаружения и определения местоположения судов, самолетов, других объектов, потерпевших аварию. Система КОСПАС-SARSAT передает сигнал от аварийных радиобуев АРБ (EPIRB) на частоте 121,5 или 406,025 МГц на борт геостационарных низкоорбитальных околополярных искусственных спутников Земли (далее – ИСЗ), находящихся на высоте около 800-1000 км. Далее спутники транслируют сигналы на наземные приемные станции – пункт приема информации (далее – ППИ), направляющие их в спасательно-координационные центры (СКЦ). Частота трансляции 1544,5 МГц. Система осуществляет постоянный радиоконтроль на частоте 406,0 МГц, на которой передаются сигналы аварийных радиобуев. Координаты излучающих АРБ определяются автоматически с использованием эффекта Доплера с точностью до 5 км.

Период обращения ИСЗ САРСАТ и КОСПАС вокруг Земли, при наклонениях орбит 98,6 и 83° соответственно, составляет 103 и 105 мин. Зона радиовидимости ИСЗ с данными характеристиками при минимальном угле кульминации АРБ над горизонтом 7° составляет примерно 2600 км, что соответствует центральному углу 23°. Время передачи аварийного сообщения складывается из времени ожидания АРБ появления ИСЗ и времени передачи информации в СКЦ [2,3].

Радиолокационный маяк – ответчик (SART-AIS) – основное средство обнаружения местоположения спасательных средств в районе бедствия.

При облучении приемника SART импульсом радиолокационной станции спасательного судна, он начинает излучать ответный звуковой и световой сигнал. Сигнал SART на экране радара поискового судна индицируется серией точек (12 или 20), а также отображается на электронной карте. Дальность обнаружения SART судовой РЛС не менее 5 миль; SART выдерживает сбрасывание в воду с высоты 20 метров, водонепроницаем на глубине до 10 метров. Емкость батареи рассчитана для работы в режиме ожидания – 96 часов, в режиме излучения – 8 часов [2, 4].

Спутники системы ГЛОНАСС непрерывно излучают навигационные сигналы двух типов: навигационный сигнал стандартной точности (СТ) в диапазоне L1 (1,6 ГГц) и навигационный сигнал высокой точности (ВТ) в диапазонах L1 и L2 (1,2 ГГц). Горизонтальные координаты определяются с точностью 50-70м (вероятность 99,7%), вертикальные – с точностью 70м (вероятность 99,7%), составляющие вектора скорости - с точностью 15см/с (вероятность 99,7%), точного времени - с точностью 0,7 мкс (вероятность 99,7%).

Пространственные координаты и точное время рассчитываются с использованием известных радиотехнических методов, с помощью измерения дальности ГЛОНАСС-приемником до не менее чем четырех видимых спутников и измерения скорости их движения. В результате решения определяются три координаты местоположения потребителя, скорость его движения и осуществляется привязка шкалы времени потребителя к высокоточной шкале Координированного всемирного времени (UTC).

Инмарсат (Inmarsat) – система мобильной спутниковой связи. На сегодняшний день Инмарсат предоставляет широкий спектр современных телекоммуникационных услуг, включая голосовую телефонную связь и пакетную передачу данных, на скорости до 64 кбит/с. Инмарсат управляет сетью из четырех основных и пяти резервных геостационарных спутников. Комический сегмент Инмарсат состоит из геостационарных спутников, находящихся на высоте 35 600 км. Три геостационарных спутника, расположенных равномерно по всей длине экватора, достаточно для «покрытия» 98% поверхности Земли. Однако приполярные области остаются вне зоны обслуживания.

NAVTEX представляет собой телексную систему УБПЧ для распространения информации для целей безопасности. Дальность действия NAVTEX, как правило, не превышает 300 морских миль от передающей станции.

VSAT (Very Small Aperture Terminal) – малая спутниковая земная станция. Для VSAT применяется упрощенная процедура получения разрешений на частоты. Состоит из двух частей: ODU (OutdoorUnit) – внешний блок, то есть антенна и приёмопередатчик, обычно 1-2 Вт и IDU (IndoorUnit) – внутренний блок или спутниковый модем. Сеть спутниковой связи на базе VSAT включает в себя три основных элемента: центральная земная станция (при необходимости), спутник-ретранслятор и абонентские VSAT терминалы. Современный VSAT обеспечивает получе-

ние информации владельцем VSAT со скоростью до 4 Мбит/с (в режиме мультикаст до 30 Мбит/с). Для резервирования каналов связи ТФ ГМО (гидрометеорологического обеспечения) введена в эксплуатацию беспроводная система связи WiMAX, эксплуатируется спутниковый канал данных ГМО Тикси – ААНИИ (Санкт-Петербург) на базе весьма перспективной для условий Арктики спутниковой станции VSAT, которая с 2012 года заменила традиционные системы мобильной спутниковой связи «Iridium» и «Inmarsat». Однако, зона покрытия спутников VSAT не заходит дальше 80 градусов северной широты [4, 5].

«Иридиум» (англ. Iridium, от лат. Iridium – иридий) – всемирный оператор спутниковой телефонной связи. Покрытие составляет 100 % поверхности Земли, включая оба полюса. Одноимённая орбитальная группировка насчитывает 66 спутников, расположенных на низких орбитах с наклонением 86,5° и высотой 780 км.

Основные технические параметры космического сегмента Иридиум (Iridium):

- количество спутников на орбите – 66 основных и 6 резервных;
- высота орбиты – 780 км;
- период обращения спутника – 100 мин. 28 сек;
- количество лучей, формируемых одним спутником – 48;
- диаметр луча – около 50 км.

Диапазон частот, используемых сетью Иридиум:

- спутник Иридиум – 1616-1626,5 МГц;
- межспутниковые связи – 23,18-23,38 ГГц;
- наземная станция – спутники Иридиум – 29,1-29,3 ГГц;
- спутники Иридиум – наземная станция – 9,4-19,6 ГГц;

Тем не менее, стоимость звонков на телефоны Iridium очень высокая, от 2 до 14 долларов за минуту. Поскольку Iridium напрямую не продает свои услуги, точную цену звонка получить сложно. Существуют многочисленные дистрибьюторы, которые активируют телефоны Iridium и продают предоплаченные SIM-карты и электронные ваучеры. Абонентские телефоны и терминалы предназначены для использования в лицензионной зоне Иридиум (на территории России на текущий момент времени система Иридиум не имеет коммерческой эксплуатации) [2, 6].

Помимо указанных, проблем с использованием спутниковых систем связи не мало:

- дороговизна как запуска в эксплуатацию, так и использования данных технологий;
- ограниченность зон действия на северных широтах (полярные области самые «неосвещаемые»);
- неустойчивость к помехам и многолучевости канала;
- нестационарность спутников, сложность алгоритмизации работы канала в нестационарных условиях.
- в ДВ-диапазоне – ограниченные функции, малая скорость передачи, относительно высокая устойчивость работы оборудования, но большие

размеры антенн, что увеличивает парусность судна, сокращает его мобильность.

Для решения ряда перечисленных проблем были разработаны технологии:

- методы и устройства обнаружения и сопровождения объектов [7, 8];
- методы повышения точности сопровождения объектов наблюдения по направлению [9], дальности и скорости;
- методы радиосвязи с повешенной помехозащищенностью и повышение пропускной способности каналов связи [10].

#### Список литературы

1. Северный морской путь. [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Северный\\_морской\\_путь](https://ru.wikipedia.org/wiki/Северный_морской_путь)
2. Веселова С.С. Спутниковые технологии в обеспечении безопасности мореплавания [Текст]: монография /С.С. Веселова, С.Н. Павликов. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2012. – 165 с.
3. Сетевые спутниковые навигационные системы. [Текст]: Пасешниченко В.Н., Вилькот С.К., Верещагин С.А., Владивосток, ТОВВМУ, 1997г
4. Морской сайт. Цифровой избирательный вызов. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://seaman-sea.ru/gmdss/373-cifrovoy-izbiratelnyy-vizov.html>
5. Википедия. VSAT. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/VSAT>
6. САТКОМДВ. Описание спутниковой системы Иридиум. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.satcomdv.ru/informaciya\\_o\\_sistemah\\_sputnikovoj\\_sa/iridium/iridium/](http://www.satcomdv.ru/informaciya_o_sistemah_sputnikovoj_sa/iridium/iridium/)
7. Свидетельство на полезную модель 67289, Россия, Радиолокационный комплекс обнаружения и сопровождения объектов /Павликов С.Н., Убанкин Е.Н. и др. – Бюл. изобр. 2007.
8. Свидетельство на полезную модель 68710, Россия, Радиолокационный комплекс обнаружения и сопровождения объектов /Павликов С.Н. и др. – Бюл. изобр.
9. Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Перспективные методы обработки сигналов в телекоммуникационных системах.– Владивосток: Мор. гос. ун-т. 2014.–99с.
10. Свидетельство на полезную модель 16576, Россия, Устройство передачи и приема информации /Павликов С.Н., Убанкин Е.Н. и др. – Бюл. изобр. 2001, №1.

УДК 004.056.52

**Об использовании метода локализации символов мысленного пароля в задачах биометрической аутентификации / С.М. Гончаров, А.Г. Михайлов, А.Е. Боршевников // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

В статье рассматривается нейросетевой преобразователь "Биометрия - код доступа" на основе электроэнцефалограммы, обрабатывающий биометрические данные, соответствующие локализованному символу мысленного пароля. Особое внимание уделяется методу локализации символа мысленного пароля на всем наборе данных электроэнцефалограммы.

Ключевые слова: *аутентификация, биометрия, нейросетевой преобразователь "Биометрия - код доступа", электроэнцефалограмма, информационная безопасность, фильтр Баттерворта.*

Библиогр.4, табл.1, ил. 1.

УДК 004.773

**Обзор возможных архитектурных решений для построения подводной акустической сенсорной сети / О.С. Громашева, Е.В. Каменная, Н.А. Леонтьева, И.А. Щербинина// Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Традиционное оборудование и протоколы локализации наземной беспроводной сети не удовлетворяют требованиям подводных сетей, которые должны функционировать в сложных условиях морской среды, а, следовательно, для организации работы подводного оборудования нужны новые технологии. В настоящее время ведутся активные разработки подводных акустических сенсорных сетей (ПАСС). Задачи применения технологий ПАСС требуют дополнительных исследований, так как в подводной сети применяется акустическая связь. Использование акустического канала для связи в ПАСС требует изучения его характеристик и свойств, а также их изменчивости в зависимости от морской среды. Важной задачей разработки ПАСС является создание новых архитектур и протоколов.

Ключевые слова: *подводная акустическая сенсорная сеть.*

Библиогр.4, ил. 1

УДК 519.22:004.67

**Алгоритм кластеризации цифровой карты глубин морского дна / /С. Ф. Ключева // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

В статье описан алгоритм кластеризации данных цифровой модели глубин морского дна. Описаны основные этапы работы алгоритма кластеризации. Приведены результаты программной модели.

Ключевые слова: *кластеры глубин, алгоритмы кластеризации, цифровая модель рельефа, метрика кластеризации.*

Библиогр. 4, табл. 2, ил. 3

УДК 656.61.052.65.011.56 (0.75.8)

**Точные вычисления изометрической широты на новом отечественном референц-эллипсоиде ГСК-2011 / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Переход с 1-го января 2017 года в нашей стране от геодезических систем координат СК-42 и СК-95, в основе которых положен референц-эллипсоид Красовского, к системе ГСК-2011 требует разработки новых способов вычисления навигационных и картографических величин. К их числу относится изометрическая широта, которая в практической навигации называется меридиональной частью. В статье предлагается простой высокоточный способ вычислений, который позволяет полностью отказаться от традиционных таблиц меридиональных частей.

Ключевые слова: *геодезическая система координат, референц-эллипсоид Красовского, ГСК-2011, WGS-84, меридиональная часть, экваториальная миля.*

Библиогр.7, табл.2, ил. 1

УДК 656.61.052.65.011.56 (0.75.8)

**Измерения с помощью судового GPS-приёмника проходимых на малой скорости расстояний / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Применению бортового GPS-приёмника в качестве судового лага препятствует отсутствие достаточного числа исследований точности определения им абсолютной скорости судна и проходимого расстояния. В данной статье показано, что при скоростях менее 1 уз обнаруживается существенная разница между расстоянием, рассчитанным по разностям обсервованных координат, и расстоянием, полученным по отсчётам абсолютной скорости судна. Предложена линейная регрессионная модель формирования поправок к отсчётам абсолютной скорости судовым GPS-приёмником GP-37 в диапазоне от 0,2 уз до 0,6 уз.

Ключевые слова: *судовой лаг, GPS-приёмник, поправка абсолютного лага, приращение координат, проходимое судном расстояние, корректор абсолютной скорости.*

Библиогр.1, табл.3, ил. 4.

УДК 656.61.052.65.011.56 (0.75.8)

**Предварительная оценка чувствительности GPS-компаса JLR-20 при измерении параметров вектора абсолютной скорости судна / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Выполнена обработка экспериментального материала, собранного автором для получения характеристик чувствительности GPS-компаса при использовании его в качестве абсолютного лага. Эксперимент проводился с трёхантенным спутниковым компасом JLR-20 на ошвартованном пароме «Бригадир Ришко» во время штиля. Обнаружена потеря чувствительности определения путевого угла при абсолютных скоростях менее 0,1 уз. Предложены направления доработки алгоритма функционирования компаса JLR-20.

Ключевые слова: *GPS-компас, GPS-приёмник, COG, SOG, модуль вектора абсолютной скорости, направление вектора абсолютной скорости.*

Библиогр.11, ил. 3.

УДК 004:656.61

**Интеллектуальные информационные технологии в управлении / Н.Г. Левченко // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. - Вып. 75/2016.**

В работе описываются интеллектуальные методы управления на транспорте. Приведен пример успешного практического применения методов искусственного интеллекта транспортным предприятием.

Ключевые слова: *транспорт, транспортная логистика, искусственный интеллект, экспертные системы, нейронные сети, системы нечеткого вывода, генетический алгоритм.*

Библиогр.7.

УДК 681.51

**Синтез робастного ПИ-регулятора на основе степени устойчивости системы управления курсом судна / Е.Б. Осокина // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Для системы управления движением судна с параметрами, изменяющимися в определенных интервалах, показано применение ПИ-регулятора, обеспечивающего робастную устойчивость и назначенное качество переходных процессов. Приводятся результаты моделирования в среде MATLAB Simulink.

Ключевые слова: *степень устойчивости, робастность, интервальные полиномы, теорема Харитонова.*

Библиогр.3, ил. 1, табл. 1.

УДК 004.94

**Виртуальный лабораторный стенд для исследования релейных систем управления приводом робота / Д.А. Оськин, М.Е. Дьяченко // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Рассмотрены возможности подсистемы Matlab SimPowerSystems для создания виртуальных стендов для моделирования релейных систем управления. Приведена структура релейной системы управления, типы релейных элементов. Описана схема виртуального стенда и порядок работы.

Ключевые слова: *система с переменной структурой, электродвигатель постоянного тока, мостовая схема управления, электропривод робота.*

Библиогр. 4, табл. 1, ил. 3.

УДК 681.5

**Система с переменной структурой для управления манипуляционным роботом / Д.А. Оськин, М.Е. Дьяченко // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Рассмотрена система с переменной структурой для двухзвенного манипуляционного робота. Приведена структурная схема и результаты моделирования.

Ключевые слова: *система с переменной структурой, манипуляционный робот.*

Библиогр. 5, ил. 3.

УДК 621.32

**Обеспечение мобильной связи в зоне неуверенного приема /С.Н. Павликов, А.С. Максеев, С.В. Пашкеев, Е.И. Убанкин// Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.**

Рассмотрены варианты решения проблемы обеспечения устойчивой радиосвязи в зоне неуверенного приема. Путем математического моделирования в программе MMANA-Gal\_basic проведен анализ способов компенсации теневого затухания и повышения качества связи.

Ключевые слова: *обеспечение, мобильной связи, зона неуверенного приема, антенна, усилитель, ретранслятор*

Библиограф. 3, табл. 2, ил. 5.

УДК 621.32

**Формирование системы информационного обеспечения безопасности судна. / С.Н. Павликов, О.В. Пузин, Е.И. Убанкин, С.В. Пашкеев // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.**

Рассмотрены несоответствие радиоэлектронного оборудования для обеспечения безопасности судна современным требованиям. Целью исследования является повышения вероятности радиолокационного обнаружения атмосферных возмущений опасных для воздушного судна и беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: *формирование, система, информационное обеспечение, безопасность судна, средства контроля, окружающая среда, лидар, радар.*

Библиограф. 6.

УДК 519.2

**Решение задачи адаптивной идентификации для модели МПО по курсу и крену/ С.С. Пашин, Д.А. Бушко // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып.00.**

В статье рассмотрена задача параметрической идентификации модели МПО по курсу и крену. Рассмотрен алгоритм скоростного градиента. Особое внимание уделяется моделированию данного подхода в системе MATLAB Simulink.

Библиогр.3, ил.4, формул.14.

Ключевые слова: *адаптация, идентификация, управление, динамический объект.*

УДК 51-72, 74

**Суперпозиция состояний как принцип моделирования / И.П. Попов // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Показано, что при математическом моделировании некоторых динамических объектов целесообразным и зачастую единственно приемлемым является представление состояния объекта в виде суперпозиции его граничных состояний. При этом промежуточное состояние зависит от значений функций состояния, характеризующих изменчивость состояния объекта.

Ключевые слова: *функция состояния, суперпозиция, переменная состояния, функция подвижности, частота, масса.*

Библиогр. 10, ил. 1

УДК 681.7.068

**Модуляция светопропускания изгибом волоконного световода / В.А. Седов // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

В работе обобщаются теоретические исследования автора в области управления светопропусканием изгибаемого волоконного световода. Исследованы физические принципы, получены математические выражения и приведены результаты моделирования для деформационно-чувствительных элементов и квазираспределенных волоконно-

оптических измерительных линий с модуляцией светопропускания путем изменения радиуса изгиба и угла изгибания волоконного световода.

Ключевые слова: *волоконно-оптическая информационно-измерительная система, волоконно-оптическая измерительная сеть, волоконный световод, амплитудный датчик, радиус изгиба, профилированная пластина, подстилающая поверхность, модуляция светопропускания, угол изгибания.*

Библиогр.7, ил. 9

УДК 62-523.8

**Создание графического веб-интерфейса для программ на ПЛК в редакторе WebVisit / В.А. Седов, Н.А. Седова // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

В работе описывается процесс создания для программируемых логических контроллеров графического веб-интерфейса в редакторе WebVisit, входящего в комплект программ AutomationWORX Software Suit компании Phoenix Contact. Приводится демонстрационный пример интерфейса для программы на языке Function Block Diagram, отображающей показания потенциометра, разработанной в программе PC WorX 6.30 для Inline контроллера PLC131, входящего в состав стартового комплекта PLC 131 Starterkit.

Ключевые слова: *программируемый логический контроллер, веб-интерфейс, веб-браузер, human machine interface, редактор WebVisit, Phoenix Contact, PC WorX, Function Block Diagram, потенциометр.*

Библиогр.9, ил. 11

УДК 656.61.052

**Компьютерное моделирование интеллектуального авторулевого для различных типов судов / Н.А. Седова // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.**

Приводятся результаты компьютерного моделирования авторулевого, содержащего нечёткий регулятор и интеллектуальный классификатор, требующие задание нейросетевых моделей движения судов, в среде Matlab. В результате моделирования определены зависимости среднеквадратической ошибки обучения нейронных сетей от типов морских судов.

Ключевые слова: *интеллектуальный авторулевой, регулятор на нечёткой логике, нейросетевая модель, среднеквадратическая ошибка, имитатор сигналов для авторулевых, нейронная сеть, нейронная сеть прямого распространения, нейронная рекуррентная сеть Элмана, алгоритм обучения Левенберга-Марквардта, алгоритм обучения Моллера, цикл обучения.*

Библиогр.7, табл.2, ил. 2

УДК 621.32

**Радиовещание в Приморском крае. / О.В. Солодков, С.С. Веселова, С.А. Сипач // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.**

Рассмотрены проблемы радиовещания в Приморском крае. Показана возросшая активность зарубежных государств и компаний по использованию частотного ресурса на территории приморского края и Дальнем Востока. Частотный ресурс ограничен и является национальным достоянием. Настораживает усиление радиовещания на русском языке виртуальными операторами с собственной интерпретацией информации. Показано, что увеличение информационного поля радиовещания отечественных радиостанций на Даль-

нем Востоке в ДВ, СВ и КВ- диапазонах возможно в короткие сроки при изменении формы собственности существующих радиостанций.

Ключевые слова: *радиовещание, качество звучания, радиопередающие устройства, цифровой стандарт, ДВ, СВ и КВ-радиостанций.*

Библиогр. 3, табл. 3.

УДК 621.32

**Информационно-образовательная среда электронного обучения.** / Е.И. Убанкин, О.В. Пузин, С.Н. Павликов, В.И. Железный // *Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии.* – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.

Приведены характеристики и функции программного комплекса «Информационно-образовательная среда электронного обучения». Программный комплекс представляет собой систему программных средств организации и сопровождения процесса дистанционного обучения, включая технологию удалённого тестирования. Программный комплекс оснащён удобным интерфейсом, сопровождаемым инструкциями для администраторов и пользователей всех уровней. Тип ЭВМ: IBM – совместимые. Язык программирования: Perl, PHP, MySQL. Операционная система: Windows. Объем программного комплекса для ЭВМ: 69,2 МБ (с инструкциями). Возможности комплекса. Комплекс может использоваться, как часть системы виртуального института для дистанционного обучения, или как самостоятельный продукт.

Ключевые слова: *информационно-образовательная среда, электронное обучение, тесты, вопросы, ответы, разбивки по билетам.*

Библиогр. 1, табл. 1.

УДК 531:681.5.01:629.5

**Робастно-адаптивный подход в управлении объектами со структурно-параметрической неопределенностью/ Е.П. Чинчукова** // *Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии.* – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.

Представлен подход в управлении объектами с неопределёнными параметрами на основе понятия устойчивости объектов с интервальными параметрами. Так же в работе описана настройка трех параметров ПИД-регулятора для управления объектами с неопределёнными параметрами, в частности МПО.

Ключевые слова: *адаптивное управление, робастное управление, системы с неопределёнными параметрами, структурно-параметрическая определенность, настройка параметров.*

Библиогр.7, ил. 4

УДК 621.391

**Математическая модель оценки эффективности радиолинии с отказами канала связи / А. В. Шевцов, Г. А. Любавский, А. О. Перцев** // *Вестник морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии.* – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 75/2016.

Рассмотрено влияние отказов различного типа на передачу информации с использованием автоматизированной радиолинии, эффективность работы которой оценивается по такому критерию, как вероятность своевременной передачи сообщений. Полученные аналитические выражения позволяют оценить зависимость своевременности связи от па-

раметров, определяющих свойства совокупности отказов, имеющих место в декаметровом канале передачи информации.

Ключевые слова: *радиолиния декаметрового диапазона; канал с отказами возникающими по различным причинам; вероятность своевременной передачи сообщений.*

Библиогр. 3, ил. 4.

УДК 621.391

**Моделирование магистральной передачи данных / А. В. Шевцов, А. А. Просянников, М. Д. Чернышенко // Вестник морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. Гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.**

В данной работе рассматривается задача моделирования магистральной передачи данных (ПД). По результатам модельных экспериментов проведен анализ работы магистральной ПД, и определен оптимальный режим её работы, при котором возможна передача максимального количества сообщений. Моделирование проведено в пакете AnyLogic.

Ключевые слова: *моделирование, имитационное моделирование, канал передачи данных, системы массового обслуживания.*

Библиогр. 4, табл. 2, ил. 7

УДК 621.391

**Модели ошибок в дискретных каналах связи / А. В. Шевцов, П. В. Журбенко, Д. Ю. Хохлов // Вестник морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.**

Рассмотрены аналитические математические модели ошибок в дискретных каналах связи, основанные на имеющейся экспериментальной статистике (исходная экспериментальная модель), как для потока независимых ошибок, так и с учётом их пакетирования (модели двоичного симметричного канала с памятью). Учитывая громоздкость этих моделей и неполную адекватность их аппроксимаций для анализа вероятностно-временных характеристик канала, рассмотрен вариант создания соответствующей имитационной модели, с которой проведены вычислительные эксперименты.

Ключевые слова: *дискретный канал связи, поток ошибок, пакетирование ошибок, двоичный симметричный канал с памятью, математическое моделирование, аналитическая модель, имитационная модель.*

Библиогр. 4, ил. 5

УДК 621.32

**Формирование технологий информационного обеспечения Северного морского пути. / Д.В. Штаев, Ю.С. Рынгачев, С.Н. Павликов // Вестник Морского государственного университета. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. Вып. 75/2016.**

Приведен анализ информационного обеспечения Северного морского пути. Рассмотрены основные проблемы предприятий региона. Приведены технологии решения наиболее значимых трудностей в северных районах. Среди них методы и устройства повышения пропускной способности каналов, помехозащищенности и помехоустойчивости, а также способы увеличения точности сопровождения объектов наблюдения по направлению, дальности и скорости.

Ключевые слова: *информационного обеспечение, Северный морской путь, обнаружение, сопровождение, точность, дальность, скорость.*

Библиогр. 10.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

С.М. Гончаров, А.Г. Михайлов, А.Е. Боршевников. Об использовании метода локализации символов мысленного пароля в задачах биометрической аутентификации.....	2
О.С. Громашева, Е.В. Каменная, Н.А. Леонтьева, И.А. Щербинина. Обзор возможных архитектурных решений для построения подводной акустической сенсорной сети.....	5
С. Ф. Ключева. Алгоритм кластеризации цифровой карты глубин морского дна.....	13
Ю. А. Комаровский. Точные вычисления изометрической широты на новом отечественном референц-эллипсоиде ГСК-2011.....	20
Ю. А. Комаровский. Измерения с помощью судового GPS-приёмника проходимых на малой скорости расстояний .....	24
Ю. А. Комаровский. Предварительная оценка чувствительности GPS-компаса JLR-20 при измерении параметров вектора абсолютной скорости судна .....	32
Н.Г. Левченко. Интеллектуальные информационные технологии в управлении .....	36
Е.Б. Осокина. Синтез робастного ПИ-регулятора на основе степени устойчивости системы управления курсом судна .....	45
Д.А. Оськин, М.Е. Дьяченко. Виртуальный лабораторный стенд для исследования релейных систем управления приводом робота.. .....	50
Д.А. Оськин, М.Е. Дьяченко. Система с переменной структурой для управления манипуляционным роботом .....	54
С.Н. Павликов, А.С. Максеев, С.В. Пашкеев, Е.И. Убанкин. Обеспечение мобильной связи в зоне неуверенного приема .....	57
С.Н. Павликов, О.В. Пузин, Е.И. Убанкин, С.В. Пашкеев. Формирование системы информационного обеспечения безопасности судна .....	64
С.С. Пашин, Д.А. Бушко. Решение задачи адаптивной идентификации для модели МПО по курсу и крену .....	70
И.П. Попов.	

Суперпозиция состояний как принцип моделирования .....	76
В.А. Седов.	
Модуляция светопропускания изгибом волоконного световода .....	82
В.А. Седов, Н.А. Седова.	
Создание графического веб-интерфейса для программ на ПЛК в редакторе WebVisit .....	96
Н.А. Седова.	
Компьютерное моделирование интеллектуального авторулевого для различных типов судов .....	104
О.В. Солодков, С.С. Веселова, С.А. Сипач.	
Радиовещание в Приморском крае .....	108
Е.И. Убанкин, О.В. Пузин, С.Н. Павликов, В.И. Железный.	
Информационно-образовательная среда электронного обучения .....	112
Е.П. Чинчукова.	
Робастно-адаптивный подход в управлении объектами со структурно- параметрической неопределенностью .....	115
А.В. Шевцов, Г.А. Любавский, А. О. Перцев.	
Математическая модель оценки эффективности радиолинии с отказами канала связи .....	120
А.В. Шевцов, А.А. Просянников, М. Д. Чернышенко.	
Моделирование магистрали передачи данных .....	127
А. В. Шевцов, П.В. Журбенко, Д. Ю. Хохлов.	
Модели ошибок в дискретных каналах связи .....	137
Д.В. Штаев, Ю.С. Рынгачев, С.Н. Павликов.	
Формирование технологий информационного обеспечения Северного морского пути .....	144

*Научное издание*

Вестник Морского государственного университета

Серия: Автоматическое управление, математическое  
моделирование и информационные технологии

Вып. 75/2016

Печатается с готового оригинал-макета.

10,1 уч.-изд.л.            Формат 60 × 84/16  
Тираж 100 экз.        Заказ № 070

Отпечатано в типографии ИПК МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
Владивосток 59, ул. Верхнепортовая, 50а