

*Журнал «Научное обозрение»  
Технические науки»  
зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-57440  
ISSN 2500-0799*

*Учредитель, издательство и редакция:  
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,  
Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47  
Адрес редакции и издателя: 410056, Саратовская  
область, г. Саратов, ул. Чапаева В.И., д. 56*

**Founder, publisher and edition:  
LLC SPC Academy of Natural History,  
Post address: 105037, Moscow, p.o. box 47  
Editorial and publisher address: 410056,  
Saratov region, Saratov, V.I. Chapaev Street, 56**

*Подписано в печать 30.04.2021  
Дата выхода номера 31.05.2021  
Формат 60×90 1/8*

*Типография  
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,  
410035, Саратовская область,  
г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

**Signed in print 30.04.2021  
Release date 31.05.2021  
Format 60×90 8.1**

**Typography  
LLC SPC «Academy Of Natural History»  
410035, Russia, Saratov region,  
Saratov, 5 Mamontovoi str.**

*Технический редактор Байгузова Л.М.  
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Тираж 1000 экз.  
Распространение по свободной цене  
Заказ НО 2021/2  
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»*

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

**Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.**



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено  
Академией Естествознания

**From 2014 edition of the journal resumed  
by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов  
**Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov**

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)  
А.Н. Курзанов (A.N. Kurzanov)  
Н.Ю. Стукова (N.Yu. Stukova)  
М.Н. Бизенкова (M.N. Bizenkova)  
Н.Е. Старчикова (N.E. Starchikova)  
Т.В. Шнуровозова (T.V. Shnurovozova)

---

***НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***

***SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES***

*www.science-education.ru*

*2021 г.*

---



***В журнале представлены научные обзоры,  
статьи проблемного  
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,  
problem and practical scientific articles***

## СОДЕРЖАНИЕ

**Технические науки (05.09.00, 05.11.00, 05.12.00, 05.13.00)**

**СТАТЬИ**

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ <i>Ильичев В.Ю., Юрик Е.А.</i> .....	5
ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГРУЗОВЫХ ФРОНТОВ МОРСКИХ УГОЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ <i>Мазуренко О.И.</i> .....	11
МАРКЕРЫ И ИХ РОЛЬ В ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ ФРЕЙМВОРКА VUFORIA <i>Маслов А.С., Белов Ю.С.</i> .....	16
МОДЕЛЬ ВЫБОРКИ, ИНДЕКСИРОВАНИЯ И ОЧЕРЕДИ ОБЪЕКТОВ В СУБД FOUNDATIONDB <i>Селиванов П.А., Гришунов С.С., Белов Ю.С.</i> .....	21
СИСТЕМА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В МАЛОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ОБРАТНОГО ОСМОСА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ <i>Кызыров К.Б., Кокабаева Р.А.</i> .....	26
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АВТОНОМНЫХ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПРИДОННЫХ СТАНЦИЙ <i>Лискин В.А., Тихонова Н.Ф., Руссак Ю.С.</i> .....	32
РАЗРАБОТКА ПРОФОРИЕНТАЦИОННОЙ VR-ИГРЫ НА ПЛАТФОРМЕ UNITY <i>Сергеев Е.С., Сухова А.Е., Максимов И.С., Сенаторов Н.А.</i> .....	38
ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ИНДИКАТОРА ЧАСОВОГО ТИПА <i>Чернега Е.Ю., Семенов В.С., Будогянец А.Р.</i> .....	43
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ РАЗМОРАЖИВАНИЯ И ПОДОГРЕВА КРИОКОНСЕРВИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ КРОВИ <i>Жданов А.Е., Доросинский Л.Г., Борисов В.И., Негодяев К.Е., Евдоким Л.</i> .....	49
ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА PYTHON <i>Гридчин Н.В., Ильичев В.Ю.</i> .....	56
АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОВЕРОЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА И ДАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ЦЕНТРА МЕТРОЛОГИИ В ГОРОДЕ СЕВАСТОПОЛЕ <i>Белая М.Н., Юдина Т.В.</i> .....	61

---

**CONTENTS**
**Technical sciences (05.09.00, 05.11.00, 05.12.00, 05.13.00)**
**ARTICLES**

## STUDY OF ASYNCHRONOUS MOTOR CONNECTION RELIABILITY

*Ilichev V.Yu., Yurik E.A.* ..... 5

## USE OF DISCRETE-EVENT SIMULATION MODELING FOR PLANNING THE OPERATION OF CARGO FRONTS OF OFFSHORE COAL TERMINALS

*Mazurenko O.I.* ..... 11

## MARKERS AND THEIR ROLE IN AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY FOR MOBILE DEVICES USING THE EXAMPLE OF THE VUFORIA FRAMEWORK

*Maslov A.S., Belov Yu.S.* ..... 16

## MODEL FOR SELECTION, INDEXING, AND QUEUING OBJECTS IN DBMS FOUNDATIONDB

*Selivanov P.A., Grishunov S.S., Belov Yu.S.* ..... 21

## ENERGY RECOVERY SYSTEM IN A SMALL REVERSE OSMOSIS DESALINATION PLANT: EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES

*Kyzyrov K.B., Kokabayeva R.A.* ..... 26

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A COMPLEX OF AUTONOMOUS HYDROLOGICAL-HYDROCHEMICAL BOTTOM STATIONS

*Liskin V.A., Tikhonova N.F., Russak Yu.S.* ..... 32

## DEVELOPMENT OF A PROFORIENTATION VR GAME ON THE UNITY PLATFORM

*Sergeev E.S., Sukhova A.E., Maksimov I.S., Senatorov N.A.* ..... 38

## DIGITAL MODULE FOR DIAL GAUGE

*Chernega E.Yu., Semenov V.S., Budogyants A.R.* ..... 43

## OVERVIEW OF ELECTRONIC TEST EQUIPMENT FOR DEFROSTING AND HEATING OF CRYOPRESERVED BLOOD PRODUCTS

*Zhdanov A.E., Dorosinskiy L.G., Borisov V.I., Negodyaev K.E., Evdochim L.* ..... 49

## CONSTRUCTION AND STUDY OF DIRECTIONAL DIAGRAMS OF ANTENNA ARRAYS BY MEANS OF PYTHON LANGUAGE

*Gridchin N.V., Ilichev V.Yu.* ..... 56

## ANALYSIS OF THE METROLOGICAL ACTIVITY OF THE VERIFICATION LABORATORY OF VACUUM AND PRESSURE MEASUREMENT OF THE TERRITORIAL CENTER OF METROLOGY IN THE CITY OF SEVASTOPOL

*Belaya M.N., Yudina T.V.* ..... 61

## СТАТЬИ

УДК 621.313.333

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ****Ильичев В.Ю., Юрик Е.А.***Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Проблемой при использовании схем с асинхронными двигателями часто является их недостаточная надёжность. В арсенале проектировщиков нет простых программных продуктов, позволяющих рассчитывать надёжность таких схем. Цели работы – разработка программы для расчёта надёжности схем подключения асинхронных трёхфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и выбор наилучшей схемы. Использован язык программирования Python, позволяющий производить вычисления, создавать интерфейс пользователя, выводить графики. Реализован алгоритм «коэффициентного метода» расчёта надёжности, выбранного по причине удобства сравнения схем с использованием среднестатистических интенсивностей отказа их элементов и возможности учёта условий эксплуатации. Рассчитана надёжность двух широко применяемых схем подключения асинхронных двигателей: со снижением и без снижения пускового напряжения при использовании их в разных условиях эксплуатации. Результаты расчёта зависимостей вероятностей безотказной работы от времени позволили наглядно продемонстрировать надёжность каждой рассмотренной схемы. Схема со сниженным напряжением запуска обладает меньшей надёжностью при эксплуатации, однако обеспечивает меньшую вероятность выхода из строя двигателя. Поэтому было решено дополнительно рассчитать показатели надёжности схемы с понижением напряжения, но с использованием резервирования. Оказалось, что такая схема в сложных условиях эксплуатации обеспечивает надёжность даже выше, чем схема без понижения пускового напряжения, поэтому она и рекомендуется для применения. В заключение сделаны выводы по результатам исследования, а также намечены цели будущих разработок при решении задач проектирования элементов электросиловых схем.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, системы управления и защиты, надёжность систем, коэффициентный метод расчёта надёжности, язык Python

**STUDY OF ASYNCHRONOUS MOTOR CONNECTION RELIABILITY****Ilichev V.Yu., Yurik E.A.***Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

The problem when using circuits with asynchronous motors is often their lack of reliability. Designers does not have simple software products that allow to calculate the reliability of such schemes. The goals of the work are to develop a program for calculating the reliability of circuits of asynchronous three-phase electric motors with a short-circuited rotor and choosing the best circuit. Python programming language is used, which allows to make calculations, create a user interface, and output graphs. The algorithm of «coefficient method» of calculating reliability, chosen due to convenience of comparing schemes using average failure rates of their elements and possibility of taking into account operating conditions, is implemented. Reliability of two widely used connection schemes for asynchronous motors is calculated: with and without lowering the starting voltage when using them in different operating conditions. Results of calculating dependencies of probabilities of failure-free operation over time made it possible to clearly demonstrate reliability of each scheme considered. Reduced start voltage circuit has less reliability during operation, but provides lower probability of engine failure. Therefore, it was decided to additionally calculate the reliability indicators of the circuit with decrease in voltage, but using redundancy. It turned out that such a circuit in difficult operating conditions provides reliability even higher than the circuit without lowering of starting voltage, so it is recommended for use. Conclusions were drawn from results of the study, as well as goals of future developments in solving the problems of designing electric power circuits.

**Keywords:** asynchronous electric motor, control and protection systems, reliability of systems, efficiency method of reliability calculation, Python language

Электрические схемы с асинхронными трёхфазными электродвигателями с короткозамкнутым ротором нашли широкое применение во многих производственных процессах.

По сравнению с другими типами приводов они обладают следующими достоинствами [1]:

- простой конструкцией и компактностью, низкой ценой, высоким КПД;
- широким модельным рядом и, соответственно, возможностью подбора параметров;
- быстротой запуска и отключения, большим допусаемым диапазоном нагрузок.

Мало исследованным вопросом при использовании схем подключения асинхронных двигателей является прогнозирование изменения технического состояния с течением времени и обеспечение их надёжной работы в сложных условиях эксплуатации, таких как нестабильность питающего напряжения и нагрузок, неоптимальные условия окружающей среды, низкий уровень обслуживания, попадание загрязнений в электродвигатель и в устройства управления [2].

Как показывает практика эксплуатации, интенсивность отказа самих асинхронных

двигателей во много раз ниже, чем у прочих элементов, входящих в электрические схемы их подключения [3], и неисправное состояние наступает обычно из-за недостаточной надёжности элементов, из которых состоят системы управления и защиты [4].

До сих пор отсутствует простой программный продукт, позволяющий выбрать оптимальную с точки зрения надёжности схему подключения двигателя.

Цель работы – сравнение надёжности схем подключения асинхронных двигателей в разных условиях эксплуатации [5]. Характеристики надёжности должны оцениваться с помощью специально разработанной программы. На основе проведённых расчётов необходимо разработать средства повышения надёжности схем подключения двигателей.

### Материалы и методы исследования

Рассматривалась надёжность двух основных схем подключения асинхронных трёхфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Обе схемы подключения нереверсивные, первая – с запуском при сниженном напряжении (рис. 1, а), вторая – без снижения пускового напряжения (рис. 1, б).

Для представленных схем необходимо было выбрать методику расчёта их надёжности, являющуюся основой алгоритма разрабатываемой программы.

Согласно теории надёжности, основной характеристикой безотказности элемен-

тов, составляющих любую исследуемую на надёжность систему, является интенсивность отказов  $\lambda$ . Значение  $\lambda$  принимается постоянным и соответствует номинальному электрическому режиму и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации. Значения  $\lambda$ , приводимые в технической документации и современных справочниках по надёжности, характеризуют безотказность элементов с учётом разных типов отказов: внезапных и постепенных [6].

Для составления алгоритма расчёта надёжности рассматриваемых схем подключения двигателя применён «коэффициентный метод», описанный в [4] и хорошо зарекомендовавший себя при расчёте надёжности электрических схем. Данный метод основан на теории надёжности и статистических выкладках, сформированных по результатам многочисленных экспериментальных исследований элементов электрических схем, работающих в разных условиях.

При использовании «коэффициентного метода» базовым элементом электрической схемы считают резистор, коэффициент надёжности которого принимается равным 1, а числовое значение интенсивности отказов для базового элемента равно  $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ . Это первое из исходных данных, необходимое для создания расчётной программы. Данное значение интенсивности отказов базового элемента вводится в поле пользовательского интерфейса программы, и при необходимости его можно изменить.

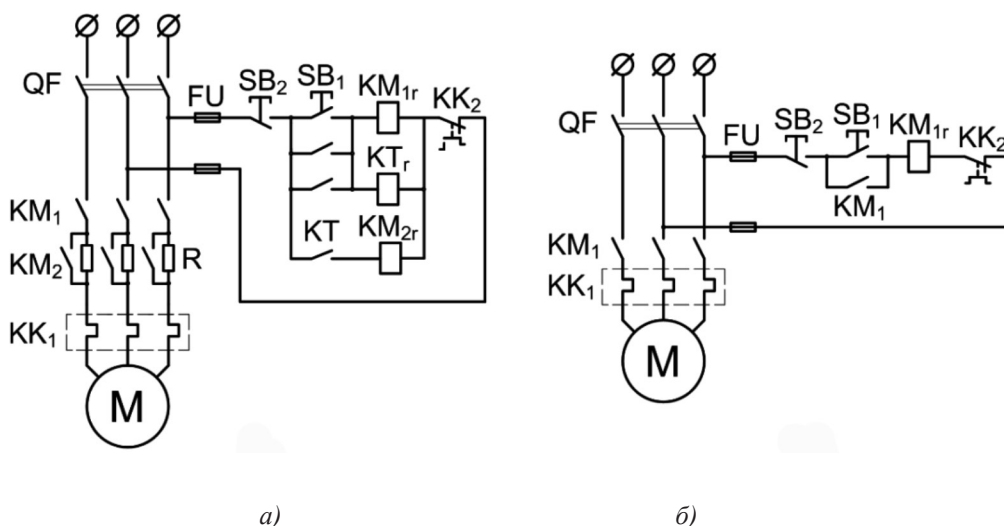


Рис. 1. Схемы включения асинхронного двигателя со снижением (а) и без снижения (б) пускового напряжения: QF – автоматический выключатель; FU – плавкие предохранители; KK<sub>1</sub> – термореле со своим выключателем KK<sub>2</sub>; KT<sub>r</sub> и KT – катушка и выключатель реле времени; KM<sub>1</sub> и KM<sub>2</sub> – контакты магнитных пускателей, срабатывающие от катушек реле KM<sub>1r</sub> и KM<sub>2r</sub>; резисторы R; SB1 и SB2 – кнопки «Пуск» и «Стоп»

Надёжность остальных элементов, входящих в состав электрической схемы, учитывается с помощью коэффициентов надёжности, показывающих, во сколько раз надёжность рассматриваемого элемента превышает базовую надёжность. В описании метода присутствуют таблицы, позволяющие определить коэффициент надёжности для любого элемента схемы.

Условные обозначения всех элементов, входящих в электрические схемы подключения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, изображённые на рис. 1 и 2, внесены в разрабатываемую программу, как и определённые для них коэффициенты надёжности для нормальных условий эксплуатации (температура 20 °С, давление 1 атм).

Пользовательский интерфейс ввода данных для работы разрабатываемой программы, сформированный с помощью библиотеки Tkinter языка Python, представлен на рис. 2.

Также в используемом методе расчёта используются поправочные коэффициенты электрической нагрузки, температуры, потребляемой мощности, которые в нормальных условиях эксплуатации равны 1, что и отображено в полях программы. Исключение в рассматриваемом случае составляет коэффициент мощности, так как схемой предусмотрено, что некоторые элементы (плавкие предохранители, резисторы и др.) постоянно недогружены по мощности.

Ещё одним поправочным коэффициентом является коэффициент использования, который для каждого типа элемента находится по таблицам [4].

Алгоритм расчёта характеристик надёжности состоит из следующих этапов.

После нахождения произведения коэффициента надёжности каждого  $i$ -го элемента на все поправочные коэффициенты (данное произведение обозначим  $k_i$ ), определяется интенсивность отказов устройства в целом

$$\lambda_{\text{устр.}} = \lambda_0 \sum_{i=1}^n N_i k_i,$$

где  $N_i$  – число одинаковых элементов в устройстве;

$n$  – общее число типов элементов в устройстве.

Данная сумма для первой схемы управления двигателем будет представлена следующим образом (номера элементов  $i$  даются по порядку их расположения в заполняемой таблице программы, изображённой на рис. 2):

$$\sum_{i=1}^n N_i k_i = 3k_1 + 2k_2 + k_3 + k_4 + 3k_5 + k_6 + 3k_7 + 3k_8 + k_9 + 3k_{10} + 3k_{11} + k_{12} + k_{13},$$

для второй схемы

$$\sum_{i=1}^n N_i k_i = 3k_1 + 2k_2 + k_3 + k_4 + 4k_5 + k_8 + k_9 + 3k_{10}.$$

Надёжность всей рассматриваемой системы характеризуется вероятностью безотказной работы  $P(t)$  – вероятностью того, что в пределах заданного времени наработки системы  $t$  не возникнет ни одного отказа. Она определяется по формуле

$$P(t) = e^{-K_u \lambda_{\text{устр.}} t},$$

где  $t$  – время, ч;

$K_u$  – коэффициент условий эксплуатации. Для нормальных условий эксплуатации равен 1.



Рис. 2. Интерфейс программы расчёта надёжности схем управления трёхфазным асинхронным двигателем

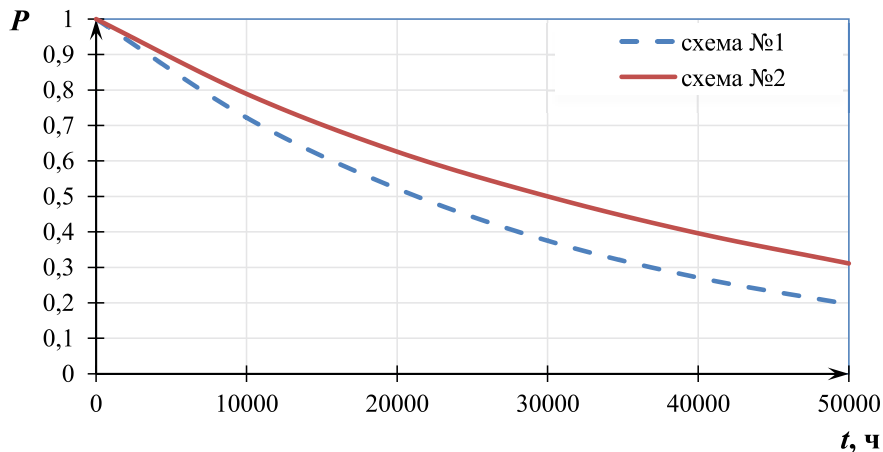


Рис. 3. Результаты расчёта зависимости вероятности безотказной работы от времени для схем управления и защиты асинхронного двигателя при нормальных условиях эксплуатации

Для достижения целей работы необходимо получить зависимости вероятности безотказной работы от времени  $P(t)$  для двух рассматриваемых схем подключения электродвигателя и для разных условий их работы.

Для создания расчётной программы был выбран современный высокоуровневый универсальный свободно распространяемый язык программирования Python. При нажатии на кнопку «Расчитать...» внизу представленного интерфейса ввода данных (рис. 2) производится расчёт схем по рассмотренному алгоритму. Вывод результатов расчётов осуществляется с помощью модуля Matplotlib языка Python в виде графиков.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Созданная программа расчёта надёжности схем управления и защиты трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором позволяет произвести анализ изменения вероятности безотказной работы с течением времени.

С помощью программы был произведён расчёт схем № 1 и № 2 с уменьшением и без уменьшения напряжения питания двигателя при пуске (соответственно рис. 1, а и рис. 1, б). Результаты расчёта при нормальных условиях окружающей среды представлены на рис. 3.

Из графиков видно, что надёжность второй, более простой, схемы подключения двигателя выше, причём разница значений вероятности безотказной работы двух схем с течением времени увеличивается. Время безотказной работы при вероятности отказа 50% (при  $P = 0,5$ ) при нормальных услови-

ях эксплуатации для первой схемы составляет 21180 ч, а для второй – 29920 ч, то есть в 1,41 раза выше.

Однако, несмотря на большую надёжность второй схемы управления и защиты, её применение приводит к уменьшению надёжности самого асинхронного электродвигателя, так как при его запуске могут наблюдаться значительные забросы напряжения в обмотках.

Далее была рассчитана надёжность двух схем при эксплуатации в сложных условиях, которые учитываются с помощью повышения коэффициента условий эксплуатации до 2,5.

Данный коэффициент заносится в соответствующее поле пользовательского интерфейса разработанной программы расчёта (рис. 3). После нажатия на кнопку «Расчитать...» получаем результаты, представленные на рис. 4.

Из графиков наглядно видно, что ухудшение условий эксплуатации схемы приводит к заметному снижению её надёжности. Если сравнивать время безотказной работы при вероятности отказа 50% (при  $P = 0,5$ ), то в данном случае для первой схемы оно снижается до 8460 ч, а для второй до 12110 ч.

Для того чтобы не снижать надёжность системы пуска и защиты двигателя и при этом исключить забросы пускового тока, в программе предусмотрена возможность расчёта схемы № 1 с применением ненагруженного резервирования – то есть возможности подключения второй аналогичной электрической схемы при отказе первой. Такое решение может считаться оправданным, так как стоимость схемы запуска ниже, чем стоимость электродвигателя, который может выйти из строя при резком запуске.



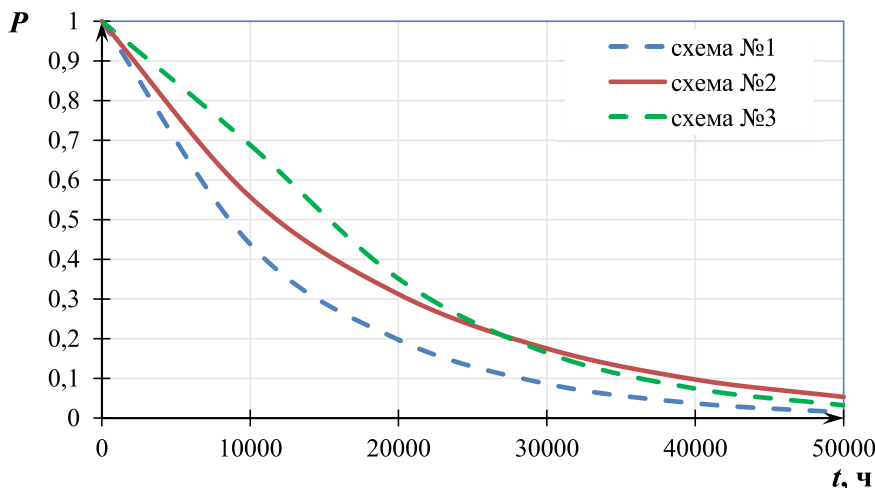


Рис. 4. Результаты расчёта зависимости вероятности безотказной работы от времени для схем управления и защиты асинхронного двигателя в сложных условиях

Результаты расчёта схемы № 1 с резервированием также приведены на рис. 4. Оказалось, что такая схема по надёжности превышает схему № 2 без резервирования до достижения непрерывной наработки около 27000 ч (3,1 года), что является для асинхронных электродвигателей очень хорошим показателем (по данным [7] наработка самого двигателя в сложных условиях может составлять 5000–10000 ч). То есть в данном случае система пуска и защиты получается более надёжной, чем сам двигатель, что является правильным.

Время безотказной работы при вероятности отказа 50% для схемы со сниженным напряжением пуска и с резервированием оказывается также самым большим из всех рассмотренных схем и составляет 14680 ч.

#### Заключение

В ходе работы последовательно были выполнены следующие этапы:

- сформулирована цель проводимой научно-исследовательской работы;
- обоснована необходимость повышения надёжности схем пуска, управления и защиты асинхронных двигателей;
- обоснован выбор метода расчёта надёжности рассматриваемых схем и описан его алгоритм;
- кратко описаны особенности процедуры разработки программы на языке Python для расчёта надёжности представленных схем;
- произведены расчёты зависимости вероятности безотказной работы от времени для разных схем подключения асинхронных электродвигателей и разных условий их эксплуатации;

– в результате анализа результатов расчётов выбрана рекомендуемая схема подключения асинхронного трёхфазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Проведённое исследование показывает удобство применения «коэффициентного метода» расчёта надёжности, позволяющего на начальном этапе проектирования достаточно просто обосновать выбор конструктивных решений с точки зрения надёжности.

Результаты расчёта позволяют выработать следующие меры повышения надёжности электрических систем запуска и защиты рассматриваемых электродвигателей [8] при условии применения элементов схемы с одинаковой надёжностью:

- 1) уменьшить значение коэффициента условий эксплуатации с помощью помещения схемы двигателя в сухом и чистом помещении с нормальной температурой воздуха и с исключением воздействия агрессивных сред;
- 2) не допускать резких скачков тока в обмотках двигателя путём применения схемы № 1, при этом надёжность схемы можно значительно повысить с помощью резервирования.

Необходимо отметить, что усложнение схемы приводит к увеличению стоимости, габаритов и массы установки, поэтому эти факторы также нужно учитывать при составлении технико-экономического обоснования выбора той или иной схемы уже на этапе проектирования.

В ходе дальнейших исследований планируется разработка комплекса программ для расчёта, исследования и оптимизации прочих электрических схем. Таким образом, будут продолжены разработки авторов, на-

правленные на совершенствование элементов электроэнергетического оборудования (описанных в [9–11] и в других статьях).

#### Список литературы

1. Воробьев А.Э., Фатянов С.О. Анализ причин отказов в работе асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве и в промышленном производстве // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2017. № 2 (5). С. 169–174.
2. Прудников А.Ю., Боннет В.В., Логинов А.Ю., Потапов В.В. Экспериментальная проверка способа диагностирования эксцентриситета ротора асинхронного двигателя // Вестник КрасГАУ. 2015. № 11 (110). С. 73–77.
3. Chetoshnikova L.M., Buhanov S.S., Gryzlov A.A. Analyzing the problem of increasing industrial electric drive reliability. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings. 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076348.
4. Давыдова Т.И., Калашников А.В. Коэффициентный метод расчета надежности функциональной части платы питания // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 121–125.
5. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Матюшков В.Е., Цырельчук И.Н. Методика прогнозирования надежности электронных устройств для системы Арион // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2011. № 1. С. 383–385.
6. Бурков А.Ф., Катаев Е.В., Кувшинов Г.Е., Чупина К.В. Анализ надежности электродвигателей, используемых в современных электроприводах // Электроника и электротехника. 2017. № 1. С. 1–6.
7. Савельев В.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Скоробогатов А.А., Сулыненков И.Н. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 4. С. 44–53.
8. Давыдова Т.И., Калашников А.В. Коэффициентный метод расчета надежности функциональной части платы питания // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 121–125.
9. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчета упорных подшипников скольжения на языке Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14–18.
10. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Анализ массивов данных с использованием библиотеки Pandas для Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 4. С. 41–45.
11. Ильичев В.Ю., Витчук П.В. Исследование динамических характеристик пластинчатых муфт // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 4. С. 217–225.

УДК 004:656.615

## ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГРУЗОВЫХ ФРОНТОВ МОРСКИХ УГОЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Мазуренко О.И.

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, e-mail: mazurenko.olga@gmail.com

Настоящая статья посвящена вопросу обоснования использования методов дискретно-событийного имитационного моделирования при формировании методики планирования работы грузовых фронтов морских угольных терминалов. Статья рассматривает общепринятые научные методы, которые используются для оценки сложных транспортных систем и узлов. Проводится оценка преимуществ и недостатков использования методов линейного программирования для формирования на их основе методики планирования работы морских терминалов. Далее в статье проводится оценка существующих видов и методов имитационного моделирования, их особенностей и направлений применения. На основе оценки сделан вывод о целесообразности использования именно дискретно-событийного моделирования для создания модели морского экспортного угольного терминала. Наиболее удобным и распространенным программным средством для создания имитационной модели признана среда Anylogic. В статье дана краткая оценка преимуществ проведения моделирования в среде Anylogic, а также сформулирован перечень рекомендаций и шагов по построению модели в данной среде. Далее разработан алгоритм создания дискретно-событийной имитационной модели в среде Anylogic. Сделан вывод о том, что в современной отечественной транспортной науке отсутствуют примеры аналогичных моделей и идей в опубликованных исследовательских работах. Определено, что создание и применение подобной модели для осуществления планирования работы грузовых фронтов морских терминалов позволит дополнить как имеющийся практический опыт, так и существующую нормативно-правовую базу, регулиующую работу морских портов.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, морские терминалы, среда Anylogic

## USE OF DISCRETE-EVENT SIMULATION MODELING FOR PLANNING THE OPERATION OF CARGO FRONTS OF OFFSHORE COAL TERMINALS

Mazurenko O.I.

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg,  
e-mail: mazurenko.olga@gmail.com

This article is devoted to the issue of justifying the use of discrete-event simulation methods in the formation of a methodology for planning the work of cargo fronts of sea coal terminals. The article examines the generally accepted scientific methods that are used to evaluate complex transport systems and junctions. An assessment is made of the advantages and disadvantages of using linear programming methods to form on their basis a methodology for planning the work of sea terminals. Further, the article evaluates the existing types and methods of simulation, their features, and areas of application. Based on the assessment, it was concluded that it is advisable to use discrete-event modeling to create a model of a sea export coal terminal. The Anylogic environment is recognized as the most convenient and widespread software tool for creating a simulation model. The article gives a brief assessment of the benefits of modeling in the Anylogic environment, as well as formulates a list of recommendations and steps for building a model in this environment. Further, an algorithm for creating a discrete-event simulation model in the Anylogic environment is developed. It is concluded that in modern domestic transport science there are no examples of similar models and ideas in published research papers. It was determined that the creation and application of such a model for planning the work of cargo fronts of sea terminals will complement both the existing practical experience and the existing legal and regulatory framework governing the operation of seaports.

**Keywords:** simulation modeling, marine terminals, Anylogic

В современной отечественной транспортной науке отсутствуют научно обоснованные методики планирования работы грузовых фронтов морских угольных терминалов [1]. Для выполнения анализа особенностей работы сложных технических систем и их элементов зачастую выполняются пять основных действий: описание системы математическим языком; определение особенностей внутреннего взаимодействия звеньев системы; описание внешних воздействий на систему; определение требований к внутренней динамике систе-

мы; оценка результатов работы системы, синтез её подсистем.

Для комплексного исследования морских терминалов, которые являются сложными динамическими системами, состоящими из большого числа элементов, методами линейного программирования необходимо формулировать дифференциальные уравнения, которые бы связывали входные и выходные параметры системы.

На практике после решения систем дифференциальных уравнений получается несколько итоговых решений, кото-

рые ограничены к выходным параметрам. При появлении в системе новых связей между элементами системы дифференциальных уравнений необходимо решать заново с учетом новых переменных, что часто приводит к появлению ошибок.

Цель исследования: обосновать использование методов дискретно-событийного имитационного моделирования при формировании методики планирования работы грузовых фронтов морских угольных терминалов.

#### **Материалы и методы исследования**

С использованием методов анализа и синтеза в исследовании проводится выявление основных направлений и методов моделирования транспортных систем. На основе общедоступных публикаций дана оценка существующих методов имитационного моделирования. Эвристическим методом обосновывается целесообразность использования методов дискретно-событийного моделирования.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Особенности современной рыночной ситуации вынуждают лиц, ответственных за принятие решений касательно планирования работы морских терминалов, действовать в крайне быстро изменяющихся условиях и ситуациях.

Динамично изменяющаяся ситуация требует от них постоянно просчитывать различные новые варианты действий, что крайне сложно реализовать исключительно с помощью методов линейного программирования, систем дифференциальных уравнений и получаемых эксплуатационных и экономических результатов.

Среда, в которой функционируют морские терминалы, постоянно меняется не только под влиянием внешней ситуации (как рыночной, так и транспортной), но и под воздействием внутренних сил, возникающих в процессе взаимодействия элементов. Что касается угольных терминалов, то необходимость принятия оперативных решений особенно характерна для таких внутренних процессов, как оперативная подача и уборка железнодорожного подвижного состава, организация выгрузки вагонов, работа стокеров и реclaimerов, работа морских грузовых фронтов и судопогрузочных машин, управление персоналом и докерами, планового и оперативного ремонта машин и механизмов [2].

Принятие столь большого числа решений значительно упрощается путем использования имитационного моделирования,

которое сегодня получает очень широкое распространение в транспортной науке. Основным плюсом имитационного моделирования является возможность проведения экспериментов со сложными системами с целью выявления «узких мест», настройки более точных взаимосвязей элементов, выявление проблем в устойчивости их работы.

Проведение экспериментов с виртуальными моделями сложных систем с помощью имитационного моделирования позволяет имитировать комбинации всех возможных режимов и условий работы, что не всегда возможно в реальной ситуации, а порой и крайне экономически невыгодно.

В работах ряда отечественных авторов: Б.И. Алибекова, И.О. Бондарева, А.В. Галина, А.В. Кириченко, А.Л. Кузнецова, А.Г. Куприяшкина, Н.Н. Майорова, С.С. Павленко, В.А. Погодина, И.А. Русина, А.Л. Степанова, В.А. Фетисова, В.Н. Щербаковой-Слюсаренко, Я.Я. Эглиты – обосновано использование имитационного моделирования как основного инструмента для осуществления проектирования, управления и планирования работы морских портов и терминалов. Указанными авторами установлено, что имитационное моделирование позволяет получить точную и детальную информацию о результатах работы моделируемых объектов в различных условиях и ситуациях, а варьирование значений входных параметров позволяет изучать специфику работы всех взаимосвязанных элементов сложных транспортных систем и объектов, а также получать научно обоснованные результаты [3].

Ядром имитационного моделирования является математическая модель, внутри которой реализованы и описаны математическим языком все элементы, системы и подсистемы, а также механизмы, имитирующие их взаимодействие и уровень взаимного влияния друг на друга.

В современной науке выделяют четыре основных вида имитационного моделирования:

1. Дискретно-событийное моделирование, в котором процесс функционирования системы является хронологической последовательностью происходящих событий (события происходят друг за другом в определенные моменты времени и ведут к изменению общего состояния системы).

2. Агентное моделирование, в котором процесс поведения системы является результатом действия групп децентрализованных агентов, имеющих своё собственное заданное автором поведение. Поведение агентов определяется на индивидуальном уровне, а общий результат от их деятель-

ности влияет на глобальное состояние моделируемого объекта или системы. Это так называемое моделирование снизу вверх, когда действия отдельных мельчайших единиц влияют на общее состояние системы.

3. Системная динамика, которая изучает сложные системы, их поведение во времени, а также взаимное влияние друг на друга в зависимости от времени и структуры взаимосвязей (причинно-следственных связей, петель обратной связи, задержек реакции).

4. Моделирование, требующее применения нескольких указанных методов.

Самым распространенным в России программным средством для проведения имитационного моделирования является среда Anylogic. Это программная разработка российской IT-компании, которая становится всё более популярной по всему миру.

Набор библиотек Anylogic с собственными элементами и условиями позволяет детально описать все процессы, происходящее на морском терминале. Так, например, для моделирования работы железнодорожного грузового фронта (ЖГФ) можно использовать железнодорожную библиотеку, для моделирования работы склада (СК) и морского грузового фронта терминала (МГФ) можно использовать библиотеку производственных систем и библиотеку моделирования потоков [4]. Более детальная проработка внутренних связей угольного терминала возможна с использованием библиотеки моделирования процессов.

В среде Anylogic реализован удобный пользовательский интерфейс, который позволяет отслеживать внутренние взаимосвязи между элементами в режиме реального времени и видеть поведение системы наглядно. Визуализация результатов деятельности системы позволяет проверять адекватность разработанной модели, а также выявлять все ошибки с помощью форматно-логического контроля.

Использование имитационного моделирования в среде Anylogic для моделирования работы морского угольного терминала позволяет:

1. Получать наглядную иллюстрацию технологического процесса работа терминала с представлением результатов в табличной форме и в форме диаграмм.

2. Сводить в табличных формах результаты экспериментов для использования в базах данных (big data) для анализа.

3. Выполнять различные эксперименты над моделируемым терминалом, при этом нельзя экономических затрат.

4. Прогнозировать в рамках экспериментов работу того или иного элемента терминала, а также всей системы в целом.

5. Варьировать в широких пределах значения входящих переменных, получая возможность просчитывать наиболее широкий диапазон сценариев поведения терминала в различных условиях и под влиянием дифференцированных факторов внешней среды.

6. Проводить неограниченное количество экспериментов с моделью широким диапазоном параметров функционирования модели для выявления наиболее экономически эффективных вариантов планирования работы терминала (в связи с тем, что после прогонов имитационной модели с различными входящими параметрами среда позволяет получить множество вариантов решений, то необходимо также заранее определить критерий, по которому выбирается наиболее подходящий для конкретного терминала вариант).

Одной из задач, которая возникает при реализации имитационной модели в среде Anylogic, является необходимость синхронизации виртуального и реального времени протекания процессов. Решение этой задачи сводится к подчинению модели теории подобия, которая требует определения инвариантов подобия.

Особенность имитационного моделирования в среде Anylogic также заключается в том, что наличие возможности проводить неограниченное количество экспериментов влечёт за собой необходимость определять приемлемую достоверность моделирования. Зависимость в данном случае следующая: чем больше необходимая точность, тем большее количество экспериментов необходимо провести.

В среде Anylogic возможно совмещение нескольких видов моделирования в рамках одной модели. Так, например, системную динамику можно использовать для моделирования процессов макроуровня, таких как воздействие других элементов как национальной и мировой транспортной системы на конкретный транспортный объект. Агентное моделирование позволит более точно рассчитывать причинно-следственные связи, которые влияют на поведение элементов (агентов) в рамках модели и провоцируют его на принятие того или иного решения.

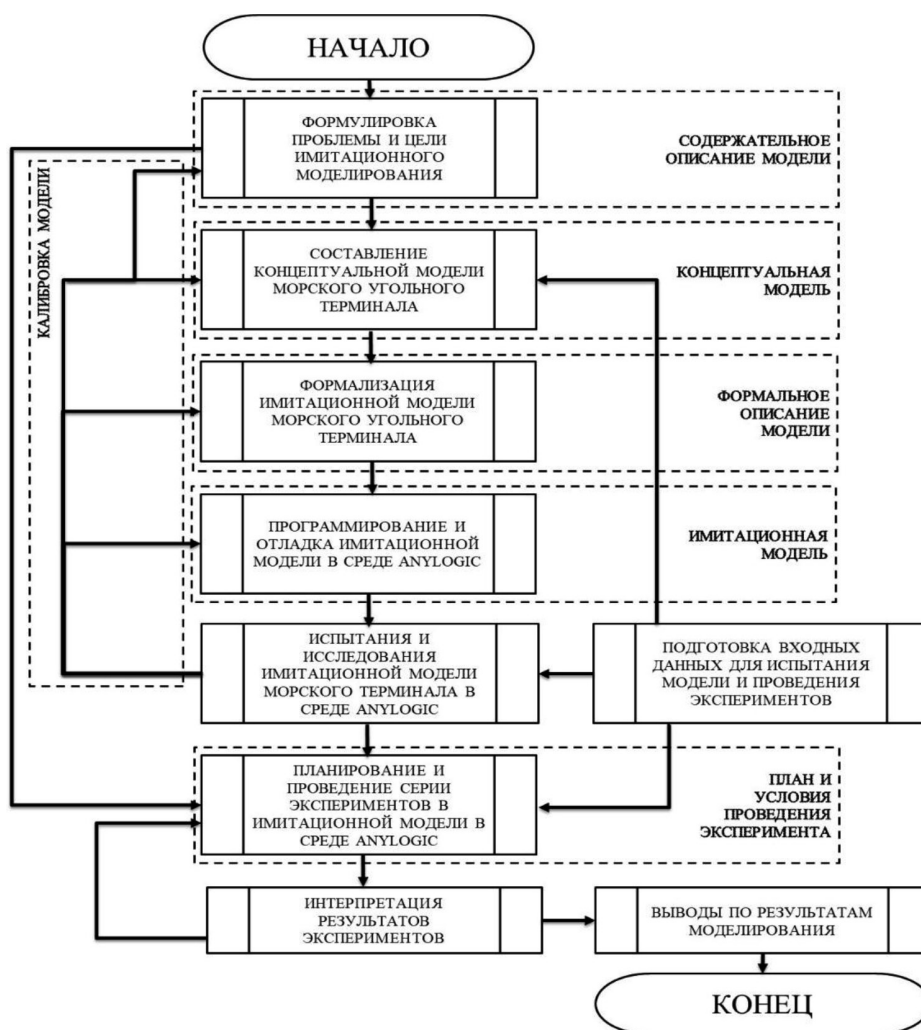
Агентами могут выступать транспортные средства, перегрузочные механизмы и машины, железнодорожные вагоны и локомотивы, суда и пр. Зачастую агентное моделирование является достаточно трудоемким и требующим очень точно прописывать все маркеры и события, которые влияют на изменение поведения агента. Однако большим преимуществом использования агентного моделирования является возможность вызывать общее изменение поведения системы для адаптации к действиям агентов.

Тем не менее зачастую при моделировании сложных транспортных объектов предпочтительно использовать дискретно-событийное моделирование, позволяющее выстроить порядок возникновения событий и ответной реакции элементов системы во временном пространстве, а системную динамику и агентное моделирование вводить дополнительно для повышения качества и точности моделирования. Комбинация всех трёх видов моделирования в рамках одной модели позволяет учесть индивидуальное поведение всех агентов, оценить влияние окружающей среды на макроуровне (в рамках системной динамики), а также привязать последовательность возникновения событий к виртуальному и реальному времени, однако требует от автора модели значительного внимания к деталям и является крайне трудозатратным [5].

В этой связи в диссертационном исследовании для моделирования сложной транспортной системы, которой является

морской угольный экспортный терминал, целесообразно использовать именно дискретно-событийное моделирование. Это позволит представить работу терминала с точки зрения процессов, которые представляют собой последовательность операций: прибытие груженого вагона с углем, выгрузка угля на склад, штабелирование и складирование, погрузка угля на навалочное судно [6].

Использование дискретно-событийного моделирования терминала позволит достаточно точно и детально реализовать модель, представив внутри неё все происходящее технологические операции и процессы, а затем провести эксперименты по планированию работы грузовых фронтов терминала в разных режимах, что даст возможность сформулировать методику планирования работы и дать рекомендации по возможности потенциального увеличения грузооборота терминала. При этом важно точно сформировать блоки имитационной модели (процессов) и установить их взаимосвязи (рисунок).



Алгоритм проведения имитационного моделирования морского экспортного угольного терминала

Минусом дискретно-событийного моделирования является то, что все элементы модели пассивны и выполняют только заранее заданные функции, а отличаются друг от друга лишь скоростью и последовательностью обработки заявок. Тем не менее данным недостатком можно пренебречь в связи с очевидным облегчением сложности создания модели.

Начальным этапом имитационного моделирования угольного терминала в среде Anylogic является формулировка проблемы, определение цели моделирования и составление содержательного описания объекта. Второй этап – создание концептуальной модели объекта моделирования и её формальное описание. После проведения формализации и создания концептуального описания проходит процесс программирования модели в среде Anylogic, то есть создание машинных алгоритмов, описание зависимостей и отладка имитационной модели.

После создания модели в среде Anylogic проходят испытания модели: верификация, оценка адекватности, калибровка и комплексное тестирование. Далее с готовой моделью можно проводить серии имитационных экспериментов, которые позволят в итоге осуществить анализ результатов, интерпретировать их, а затем использовать для создания методики планирования работы терминала.

### Заключение

Создание и исследование дискретно-событийной имитационной модели морского угольного терминала является амбициозной, новой и недостаточно изученной задачей. В отечественной транспортной науке отсутствуют примеры аналогичных моде-

лей и идей в опубликованных исследовательских работах. Создание и применение подобной модели для осуществления планирования работы грузовых фронтов морских терминалов позволит дополнить как имеющийся практический опыт, так и существующую нормативно-правовую базу, регулирующую работу морских портов.

Освоение, разработка и апробация комплексных подобных научно обоснованных современных инновационных моделей и методик, которые позволят точнее планировать свою деятельность для терминалов и судовладельцев, делает крайне актуальными тему исследования и выбранное направление.

### Список литературы

1. Горев А.Э., Беттгер К., Прохоров А.В., Гизатуллин Р.Р. Основы транспортного моделирования. СПб.: Коста, 2015. 168 с.
2. Кузнецов А.Л., Галин А.В. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2015. № 2 (30). С. 141–153.
3. Галин А.В. Воздействие ограничений на обобщенную имитационную модель процесса развития портов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. № 1 (35). С. 7–14.
4. Кузнецов А.Л., Купцов Н.В. Функциональная структура операционных процессов морского грузового фронта современных экспортных угольных терминалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 118–126. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-118-126.
5. Фетисов В.А., Майоров Н.Н., Таратун В.Е. Имитационное моделирование как метод оптимизации сложной технической системы // Системный анализ и логистика. 2013. № 10. С. 63–69.
6. Эглит Я.Я., Устинов В.В., Эглит К.Я. Методика управления технологическими перегрузочными процессами морского порта. СПб.: «Феникс», 2014. 138 с.

УДК 004.946

## МАРКЕРЫ И ИХ РОЛЬ В ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ ФРЕЙМВОРКА VUFORIA

Маслов А.С., Белов Ю.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, филиал в г. Калуга, Калуга, e-mail: maslow.tema@yandex.ru*

За последние несколько лет дополненная реальность (AR) стала все более распространенной технологией потребительского уровня. Основными движущими силами его недавнего развития была эволюция мобильных и портативных устройств в сочетании с алгоритмами и методами из таких областей, как компьютерное зрение. В настоящее время доступны различные коммерческие платформы и SDK, которые позволяют разработчикам быстро разрабатывать мобильные AR-приложения, требующие минимального понимания базовой технологии. На сегодняшний день основное внимание как в исследовательской, так и в коммерческой среде уделяется однопользовательским AR-приложениям. Целью данной статьи является дать более углубленное понимание работы точного отслеживания маркеров в реальном мире. Необходимые сведения о понимании геометрии камеры в пространстве относительно маркера. Как именно происходит обработка изображений на мобильном устройстве для каждого кадра, полученного от камеры. Дано понятие доверительного маркера, а также приведены примеры, на что следует обратить внимание для создания хорошо отслеживаемого маркера для работы с SDK Vuforia. Рассказывается об одном из видов алгоритма нахождения доверительных маркеров, основанных на окружностях, посредством обнаружения краёв.

**Ключевые слова:** дополненная реальность, особенности маркера, отслеживание маркера, рендеринг, Vuforia

## MARKERS AND THEIR ROLE IN AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY FOR MOBILE DEVICES USING THE EXAMPLE OF THE VUFORIA FRAMEWORK

Maslov A.S., Belov Yu.S.

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, e-mail: maslow.tema@yandex.ru*

Over the past few years, augmented reality (AR) has become an increasingly common consumer-level technology. The main drivers of its recent development have been the evolution of mobile and portable devices combined with algorithms and methods from areas such as computer vision. Various commercial platforms and SDKs are currently available that allow developers to quickly develop mobile AR applications that require minimal understanding of the underlying technology. Today, the main focus, both in the research and commercial environment, is on single-user AR applications. The purpose of this article is to provide a more in-depth understanding of how accurate marker tracking works in the real world. Necessary information about understanding the camera geometry in space relative to the marker. How exactly images are processed on the mobile device for each frame received from the camera. The concept of a trust token is given, as well as examples of what you should pay attention to in order to create a well-tracked marker for working with the Vuforia SDK. This article describes a type of algorithm for finding confidence markers based on circles using edge detection tools.

**Keywords:** augmented reality, marker features, tracking marker, rendering, Vuforia

Существует несколько видов построения дополненной реальности, которые основаны на:

- маркерах;
- координатах местоположения в пространстве.

Безмаркерные технологии основываются на получении различной информации от следующих датчиков для получения более точной информации о нахождении пользователя в пространстве: GPS-приёмник, акселерометр, гироскоп и т.д.

Маркерные технологии основываются на реальном объекте, называемом маркер. Данный маркер определяется и распознается с помощью специальных приложений. На основе полученной информации от маркера, такой как положение маркера, расстояние до маркера, программа может достаточ-

но точно отобразить на него виртуальный объект, благодаря чему будет достигаться эффект его физического присутствия в реальном мире. При использовании дополнительных приспособлений, таких как графические фильтры и/или е-модели высокого качества, визуализированный объект может стать трудно отличимым от остальных элементов в сцене.

Цель исследования: дать углубленное и всестороннее понимание работы точного отслеживания маркеров дополненной реальности в реальном мире; показать необходимые сведения о понимании геометрии камеры в пространстве относительно маркера; определить, как именно происходит обработка изображений на мобильном устройстве для каждого кадра, полученного от камеры; обозначить понятие довери-



тельного маркера, а также привести примеры, на что следует обратить внимание для создания хорошо отслеживаемого маркера для работы с SDK Vuforia.

*Методы исследования.*

*Ориентирование камеры в пространстве*

Дополненная реальность на мобильных устройствах требует точного отслеживания поз 6DOF (6 степеней свободы) объектов реального мира [1]. 6DOF (6 степеней свободы) относятся к свободе перемещения твердого объекта в трехмерном пространстве. В частности, тело может свободно двигаться вперед / назад, вверх / вниз, влево / вправо в сочетании с вращением вокруг трех перпендикулярных осей (рис. 1).

Поза слежения, особенно для мобильных устройств, должна не иметь высоких требований и уметь адаптироваться к различным условиям.

Одной камеры, установленной на мобильном устройстве, обычно достаточно для настройки мобильной дополненной реальности. Videопоток с камеры одновременно используется в качестве видефона и для отслеживания позы камеры относительно окружающей среды. Это отслеживание позы должно выполняться в режиме реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами мобильного устройства.



Рис. 1. 6 степеней свободы

Для достижения надежности и производительности обычным подходом является отслеживание прямоугольных доверительных маркеров. Vuforia – это библиотека отслеживания маркеров, которую мы используем в качестве примера в данной статье в качестве AR-движка. Причина, по которой

была выбрана Vuforia, заключается в том, что она поддерживает широкий спектр мобильных платформ.

Камеры на устройстве должны быть откалиброваны до начала отслеживания так, что матрица проекции OpenGL может быть возвращена на базе платформы Vuforia.

Калибровка камеры передается в Vuforia API, возвращая матрицу проекции в стиле OpenGL, которая будет использоваться позже для умножения с позой обнаруженного отслеживаемого объекта. Причина, по которой необходима проекционная матрица, заключается в том, что экран смартфона – это 2D-поверхность. 3D-сцена, визуализируемая OpenGL, должна быть спроецирована на экран устройства в виде 2D-изображения.

Для калибровки необходимо настроить параметры ближней и дальней плоскости. Фрустум – это область пространства в моделируемом мире, которая может появиться на экране. Цель отбора видового фрустума состоит в том, чтобы определить, что находится внутри фрустума, а что нет. На экране отображаются только объекты внутри фрустума. Ближний и дальний планы являются границами этого фрустума (рис. 2) [2].

Матрица содержит не только матрицу перспективной проекции, но и фокусное расстояние, и основную точку камеры. Как показано на рис. 3 [3], тремя осями системы координат являются X1, X2 и X3. Ось X3 направлена в направлении обзора камеры и является главной осью. Точка R на пересечении оптической оси и плоскости изображения является главной точкой. Плоскость изображения расположена на расстоянии f от начала координат в отрицательном направлении и называется фокусным расстоянием.

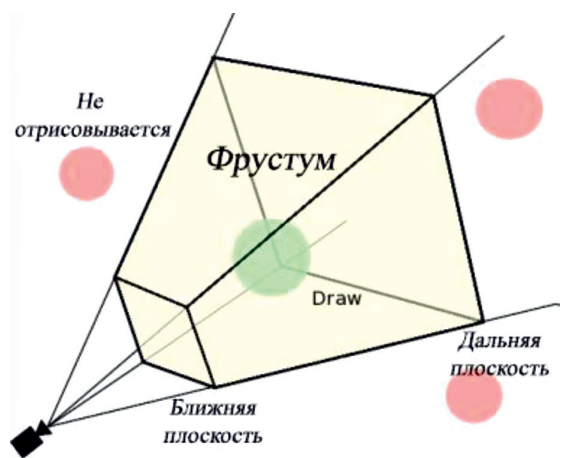


Рис. 2. Конус фрустума

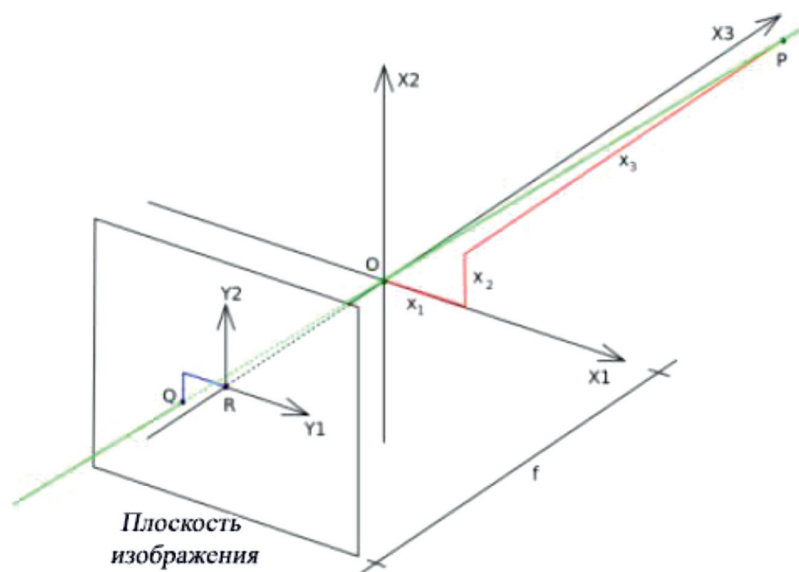


Рис. 3. Геометрия камеры



Рис. 4. Процесс отслеживания

После калибровки камеры вышеупомянутый конвейер отслеживания (рис. 4) выполняется для каждого нового кадра камеры и дает оценочную позу, если обнаружен маркер. Несмотря на то что Vuforia частично является библиотекой с открытым исходным кодом, она немного похожа на черный ящик на стороне отслеживания и не очень раскрывает, как работают ее модули отслеживания. Таким образом, показан общий конвейер отслеживания, не специфичный для Vuforia.

#### Маркеры и их особенности

Для отслеживания на основе изображений необходимы доверительные марке-

ры – это объекты реального мира, которые используются системой отслеживания. Следовательно, сначала мы должны обнаружить эти доверительные маркеры (рис. 5). Существуют различные алгоритмы обнаружения, но в принципе все они работают одинаково. Например, Ababsa и Mallem [4] представляют надежную методику кругового обнаружения, основанную на следовании краям. Алгоритм ищет ребра пиксель за пикселем. Чтобы определить край, они используют постоянное пороговое значение, которое означает, что менее яркие пиксели, чем определенный порог, считаются темными, а более яркие – яркими. Если обнаружена последовательность от темного к яркому,

эта последовательность является кандидатом на границу. Когда последовательность замыкает цикл, обнаруживаются границы. В противном случае край исключается.

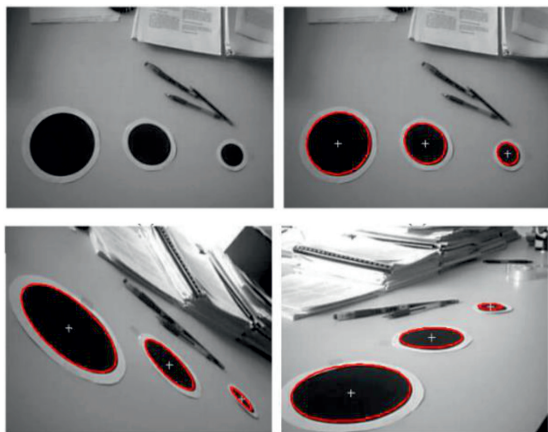


Рис. 5. Обнаружение фидуциалов

### Результаты исследования и их обсуждение

Несмотря на то что Vuforia вносит важный вклад в плане отслеживания, для того чтобы маркер мог быть обнаружен позже, маркер должен иметь большое количество признаков. Vuforia определяет термин «увеличиваемый рейтинг», который означает, насколько хорошо изображение может быть обнаружено и отслежено с помощью Vuforia SDK.

Например, левое изображение на рис. 6 содержит только два объекта для каждого острого угла, так как мягкие углы не рассматриваются как объекты. Среднее изображение не содержит ника-

ких особенностей, так как оно не содержит сильных углов. Правое изображение содержит четыре элемента.



Рис. 6. Особенности маркера

Локальный контраст маркера – это еще одна особенность, которая должна быть достаточно сильной, чтобы быть обнаруженной и отслеженной должным образом (рис. 7).

Характеристики должны быть равномерно распределены, как показано на рис. 8. Чем более сбалансировано распределение объектов в изображении, тем лучше изображение может быть обнаружено и отслежено.

Даже если изображение содержит большое количество объектов и сильный контраст, повторяющиеся паттерны, называемые сглаживанием, могут затруднить отслеживание, поскольку повторяющиеся объекты не показывают уникального паттерна для обнаружения (рис. 9).

После шага обнаружения доверительных маркеров мы имеем замкнутые полигоны. Однако они должны быть прямоугольниками, чтобы сформировать маркер. На следующем этапе прямоугольники определяются с помощью контуров. Для этапа проверки паттернов Vuforia предоставляет несколько типов трекеров (Image Tracker и др. [5]), которые расширяются от трекера базового класса.

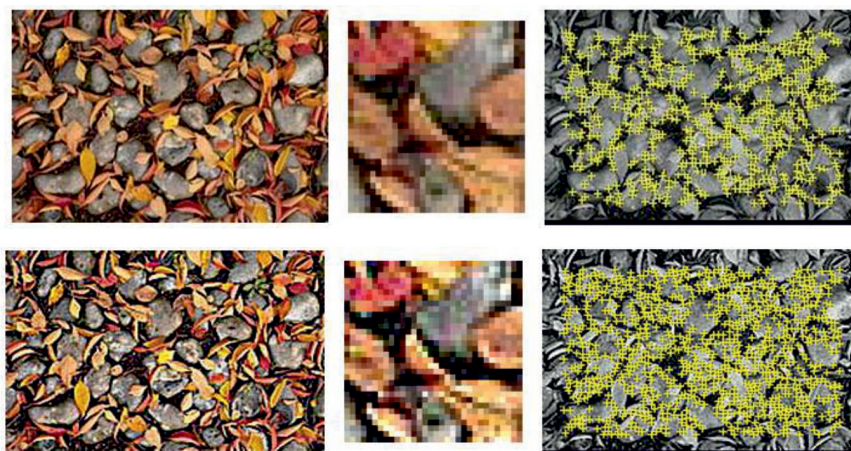


Рис. 7. Локальный контраст маркера



Рис. 8. Распределение признаков в маркерах

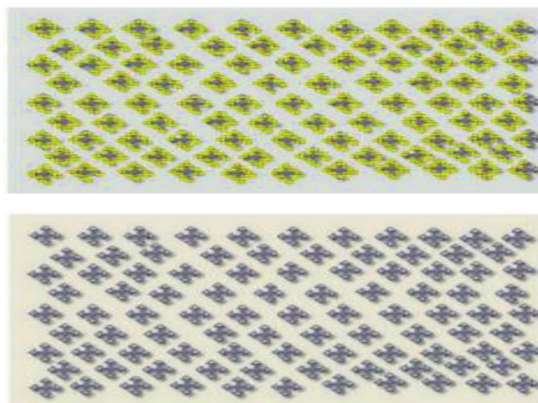


Рис. 9. Повторяющиеся объекты в маркерах

Для каждого кадра камеры вызывается функция начала класса *Renderer*, которая возвращает объект состояния. Состояние показывает отслеживаемые объекты, которые в данный момент отслеживаются трекером (например, *Image Tracker*). Когда обнаруживается паттерн, который необходимо найти, последним шагом перед рендерингом является оценка позы относительно маркера. Подобно доверительному обнаружению и проверке паттернов, существуют различные алгоритмы оценки позы, которые все используют одну и ту же базовую концепцию: сначала создается начальная догадка, которая оценивает приблизительное положение и ориентацию отслеживаемого объекта относительно камеры. Затем эта первая оценка уточняется итеративно до тех пор, пока не будут выполнены конкретные критерии качества или не будет достигнуто максимальное число итераций [6]. Полученное матричное представление затем преобразуется в матрицу *OpenGL*, чтобы иметь возможность визуализировать модель в представлении пользователя.

### Заключение

Был подробно представлен конвейер отслеживания приложений дополненной реальности в *Vuforia*, калибровка камеры, необходимая для запуска правильной сессии AR, создание доверительных маркеров,

идентификация паттернов и оценка поз обнаруженных треков. Отслеживание – это фундаментальный шаг для всех приложений дополненной реальности. Учитывая ограниченную мощность мобильных устройств, *Vuforia*, таким образом, вносит важный вклад в AR-системы, работающие на мобильных платформах.

### Список литературы

1. Ben Lang. An Introduction to Positional Tracking and Degrees of Freedom (DOF) [Electronic resource]. URL: <https://www.roadtovr.com/introduction-positional-tracking-degrees-freedom-dof/> (date of access: 19.02.2021).
2. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение: учебное пособие / Под ред. С.М. Соколова; перевод с английского А.А. Богуславского. 4-е изд. М.: Лаборатория знаний, 2020. 763 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/135496> (дата обращения: 19.02.2021).
3. Sturm P., Ramalingam S., Tardif JP. Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, Now Publishers, 2011. 6 (1-2). P. 1–183. [Electronic resource]. URL: <https://hal.inria.fr/inria-00590269/document> (date of access: 19.02.2021).
4. Ababsa F., Mallem M. A Robust Circular Fiducial Detection Technique and Real-Time 3D Camera Tracking. *Journal of multimedia*. 2008. Vol. 3. No. 4. P. 34–41.
5. Маслов А.С., Белов Ю.С. Различные виды мишеней и их распознавание в фреймворке дополненной реальности *vuforia* // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 1. С. 15–19.
6. Wagner D., Schmalstieg D. Experiences with Hand-held Augmented Reality. 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 13–16 Nov. 2007. P. 1–13.

УДК 004.652.6

## МОДЕЛЬ ВЫБОРКИ, ИНДЕКСИРОВАНИЯ И ОЧЕРЕДИ ОБЪЕКТОВ В СУБД FOUNDATIONDB

Селиванов П.А., Гришунов С.С., Белов Ю.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Калужский филиал, Калуга, e-mail: maslow.tema@yandex.ru*

По мере того как программные системы продолжают распространяться в постоянно растущих масштабах, выходя за пределы географических, организационных и традиционных коммерческих границ, требования, предъявляемые к их коммуникационным инфраструктурам, будут возрастать в геометрической прогрессии. Современные системы работают в сложных средах с несколькими языками программирования, аппаратными платформами, операционными системами и требованиями к динамическим гибким развертываниям с надежностью 24/7, высокой пропускной способностью и безопасностью при сохранении высокого качества обслуживания (QoS). Требуется какое-то надежное решение для обеспечения всех этих параметров, для построения масштабируемой и отказоустойчивой системы. Цель данной статьи – дать более глубокое понимание работы индексов, выборок и работы с очередью. Исходный драйвер от разработчиков FoundationDB предоставляет минимальный набор функций, основные из которых – сохранить ключ-значение, выбрать значение по ключу, выбрать значения по области ключей, подписаться на область ключей. Для реализации приложения данного функционала недостаточно, поэтому требуется разработать модель для хранения, индексирования, быстрых выборок и работы с очередями, которая будет хорошо работать по времени и оптимально использовать ресурсы диска.

**Ключевые слова:** FoundationDB, FlatBuffer, индексирование данных, выборка объектов, очередь объектов, масштабирование, репликация, отказоустойчивость, серверные курсоры

## MODEL FOR SELECTION, INDEXING, AND QUEUING OBJECTS IN DBMS FOUNDATIONDB

Selivanov P.A., Grishunov S.S., Belov Yu.S.

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, e-mail: maslow.tema@yandex.ru*

As software systems continue to expand at an ever-increasing scale, transcending geographical, organizational, and traditional commercial boundaries, the demands placed on their communication infrastructures will increase exponentially. Modern systems operate in complex environments with multiple programming languages, hardware platforms, operating systems, and requirements for dynamic, flexible deployments with 24/7 reliability, high throughput, and security while maintaining high quality of service (QoS). Some reliable solution is required to provide all these parameters, to build a scalable and fault-tolerant system. The purpose of this article is to provide a deeper understanding of how indexes, samples, and queuing work. The original driver from the FoundationDB developers provides a minimal set of functions, the main ones are save key-value, select value by key, select values by key area, subscribe to key area. This functionality is not enough to implement the application, so you need to develop a model for storing, indexing, quick samples, and working with queues that will work well on time and optimally use disk resources.

**Keywords:** FoundationDB, FlatBuffer, data indexing, object selection, object queue, scaling, replication, fault tolerance, server cursors

FoundationDB – это распределенная база данных, предназначенная для обработки больших объемов структурированных данных в кластерах серверов. Она организует данные в качестве упорядоченных пар ключ-значение и использует транзакции ACID для всех операций. Эта база данных особенно хорошо подходит для нагрузок чтения/записи, но также имеет отличную производительность при интенсивных операциях записи [1].

Исходный драйвер от разработчиков FoundationDB предоставляет минимальный набор функций, основные из которых – сохранить ключ-значение, выбрать значение по ключу, выбрать значения по области ключей. Для реализации приложения данного функционала недостаточно, поэтому требуется разработать модель для хранения,

индексирования, быстрых выборок и работы с очередями, которая будет хорошо работать по времени и оптимально использовать ресурсы диска.

*Серверные курсоры.* Чтобы преодолеть ограничение по величине и времени транзакции, выборка должна идти в индивидуальных микротранзакциях, сохраняя состояние в специальном объекте БД – курсоре. Перед началом выборки создается новый объект курсора со случайным идентификатором. Все курсоры должны считаться модами и храниться в БД как отдельный тип данных [2].

Поля модели:

- идентификатор UUID;
- ID типа данных (2 байта);
- момент создания (для сборки мусора неуспешно закончившихся транзакций);

- срок жизни (в секундах);
- последний обработанный ключ (или значение 0x00, если выборка еще не началась).

Чтобы сделать структуру и поведение курсора универсальным между полным перебором и выборкой по индексу, предлагается использовать ID типа данных также и для индексов, нумеруя их как отдельный тип данных.

Предполагается, что создание курсора должно идти в отдельной независимой транзакции, предшествующей выборке, а идентификатор возвращается приложению. Он может использоваться как внутри приложения, так и снаружи. Например, возвращая ID курсора в фронтенд, клиент может использовать любой доступный сервер для продолжения выборки, что повышает отказоустойчивость [3].

Серверные курсоры также могут использоваться для организации страничных выборок, но эта идея требует подробной проработки.

После использования курсор должен быть закрыт (а запись о нем в БД удалена). В случае ошибок обработки или некорректного использования, записи незакрытых курсоров могут быть проанализированы (для мониторинга системы – метрика корректности работы) и удалены сборщиком мусора.

*Полный перебор с предикатом.* Главное применение – выборки произвольного объема с любой сложностью условий, в том числе безусловные. Предикат – функция, принимающая на вход буфер объекта и возвращающая bool и error – решение, подходит элемент для выборки или нет. Для выборки только объектов определенного типа требуется поле ключа «тип данных» (2 байта, описано выше).

```
type Predicat func(buf []byte) (bool, error)
```

Функция полного перебора должна принимать на вход контекст (для прерывания выборки), ID базы (2 байта), ID типа данных (2 байта), ID курсора (пустой, если новая выборка), функцию предиката для данного типа. Выходные параметры – канал буферов и ошибка. Канал нужен для того, чтобы а) сгладить разрывы между микро-транзакциями запроса и б) корректно выйти в случае прерывания по контексту.

```
func SeqScan(ctx context.Context, db, objtype, cursor uint16, p Predicat) (<-chan []byte, error)
```

*Композитные индексы.* Главное применение – быстрые выборки по условиям равенства одного или нескольких полей [4]. Эти индексы выбираются в пользу набора простых индексов с реализацией join по следующим причинам:

- индексы по индивидуальным полям менее рационально используют место на диске;

- реализация функции Join для двух индексов будет иметь сложность не менее  $O(N \log N)$  в случае использования хеш-функции, а в худшем случае  $O(N^2)$ . Для трех и более индексов – полиномиально, в то время как сложность выборки по композиту –  $O(N)$ ;

- композитные можно использовать повторно. Например, индекс по полям (A, B, C) можно также использовать для выборок по (A, B) и (A).

Как правило, при проектировании функционала в приложении заранее известна хотя бы часть выборок, которые будут необходимы. Это позволяет некоторые индексы создавать с самого начала. А поддержка драйвером полного перебора с предикатом позволяет создать инструменты миграции и актуализации индексов после запуска приложения в производственную эксплуатацию.

При создании индекса предлагается идентифицировать их записи кодом типа данных, как и структуры, а элементы индекса разделять между собой, чтобы избежать смешения данных. Если не разделять значения, то смешение приведет к ошибке выборки.

Например, пусть есть поля A = "ав" и B = "", а у другого объекта A = "а" и B = "в". Тогда в обоих случаях запись индекса без разделителей будет равна "ав". Для разделения значений предлагается использовать два вида разделителей: 0x00 и 0xFF. Использование 0x00 после пустого значения в сортированной коллекции будет аналогично правилу NULLS FIRST, а 0xFF соответственно NULLS LAST.

Итого, структура записи индекса по полям (A NULLS LAST, B NULLS FIRST, C NULLS LAST) будет выглядеть так:

```
<ID базы><ID типа индекса><значение A>0xFF<значение B>0x00 <значение C>0xFF<UUID объекта> = ""
```

Поскольку операции с полями FlatBuffer'a достаточно легковесные, для инвалидации индекса предлагается использовать функцию определения индекса и хранение исходного буфера в памяти [5]. Функция определения – подобна функции предиката, принимает на вход ID базы, буфер объекта, а на выходе дает массив байт ключа индекса (по схеме, как показано выше) и ошибку. Такая функция позволит определять полное значение индекса, в том числе его перенос в другую БД.

Драйвер должен использовать функцию определения индекса дважды – сна-

чала передавая в него оригинальный (исходный) буфер объекта, а затем новый. Это позволит получить старое и новое значения ключа индекса без лишних выборок из БД. Затем драйвер должен удалить старое значение и записать новое. Важное ограничение – это должно быть сделано в той же транзакции, что и сохранение объекта, т.е. быть его неотъемлемой частью.

*Модель очереди.* Основная идея в том, что очередь – это специальный индекс, сортированный по дате, с отслеживанием изменения. Отслеживать легко с помощью инструмента watch клиента fdb.

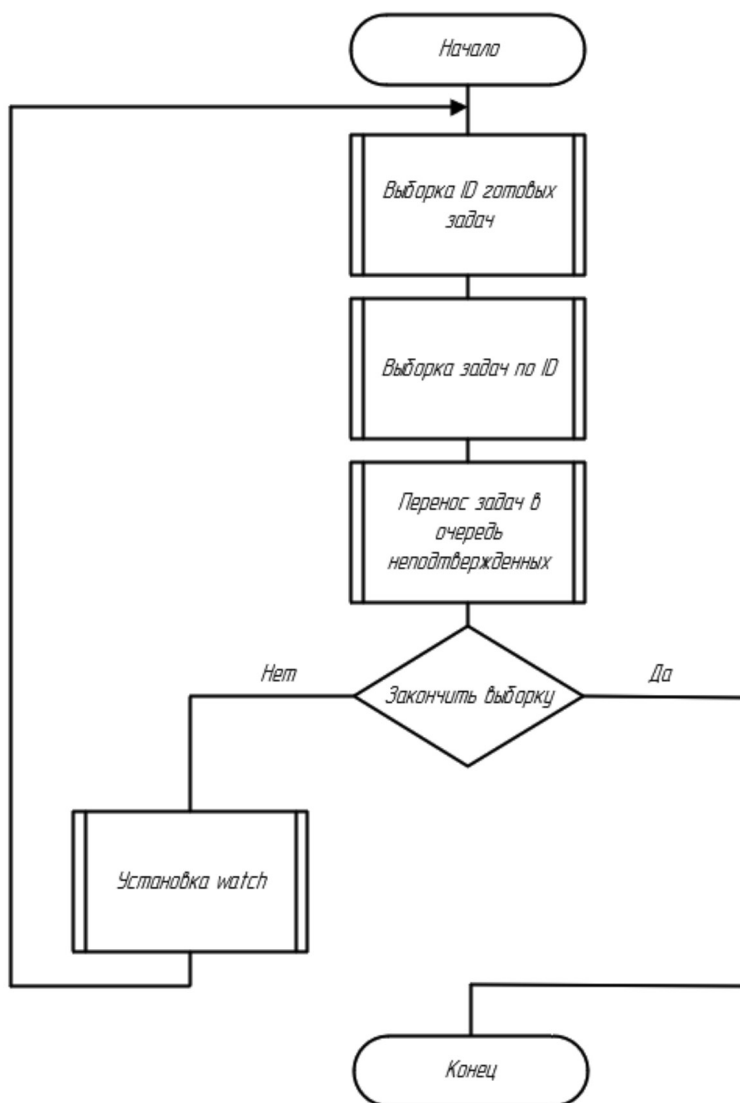
Для удобства применения элемент очереди создается с моментом времени его предполагаемого выполнения. При этом механизм подписки должен возвращать только элементы с временем выполнения меньше

текущего. Это позволит реализовать отложенные операции без лишних действий [6].

Для обеспечения гарантии обработки, при получении элемент очереди должен быть перемещен в особую коллекцию записей, которые еще не были подтверждены. Записи в этой коллекции не должны зависеть от времени, чтобы их можно было легко удалять без дополнительных данных.

Как и в случае типов данных и индексов, для идентификации очереди нужно использовать ID базы и ID типа данных. Для списка неподтвержденных элементов можно использовать тот же ID типа, но оградить его от основной очереди разделителем 0xFF.

Элемент очереди – это ID записи заранее известного приложению типа данных объектов, которые и являются реальными объектами задач.



Блок-схема алгоритма получения данных из очереди

Структуры элементов очереди:

● Обычный элемент. Выборка задач, готовых к выполнению: время задачи меньше или равно текущему времени

```
<ID базы><ID типа данных><Время выполнения задачи><ID объекта задачи> = ""
```

● Элемент списка неподтвержденных. Выборка неподтвержденных: 0xFF<задачи> меньше или равно 0xFF0xFF

```
<ID базы><ID типа данных>0xFF<ID объекта задачи> = ""
```

● // Элемент отслеживания изменений (для watch)

```
<ID базы><ID типа данных>0xFF0xFF = "<момент последнего обновления>"
```

Алгоритм получения данных из очереди:

1. Выбрать ID готовых задач (задачи меньше или равно текущее время). Либо согласно установленному лимиту, либо все готовые.

2. По списку ID выбрать сами задачи и вернуть их.

3. Переместить записи в список неподтвержденных.

4. Если требуется продолжать выборку, устанавливается watch.

5. Как только watch срабатывает, переход к п. 1.

Блок-схема алгоритма получения данных из очереди представлена на рисунке.

Исходя из алгоритма, функция получения элементов очереди должна принимать на вход ID базы, ID типа данных очереди, ID типа данных задач, а возвращать канал буферов объектов и ошибку. Объект очереди должен иметь возможность выдать все неподтвержденные задачи. Также объект очереди должен иметь функцию подтверждения получения задачи.

Возникает вопрос, абстрагировать ли работу с очередями от коллекций объектов? Если да, то работа везде идет только с обезличенными идентификаторами. Это упрощает код и вид реализации, но забота о загрузке и сохранении объектов ложится на вызывающую сторону. Отрицательный момент: поскольку метод возвращает канал, это будет стимулировать разработчиков организовывать загрузку объектов из БД по одному, что пагубно скажется на производительности [7].

Пример интерфейса:

```
// Конструктор конкретной очереди в конкретной базе
func NewQueue(db, qtype uint16) Queue {}
```

```
type Queue interface {
    Ack(uuid.UUID) error
    Pub(time.Time, uuid.UUID) error
    Sub() (<-chan uuid.UUID, error)
    Lost() ([]uuid.UUID, error)
}
```

С другой стороны, на стороне обработчика очереди Sub реально загрузка из БД идет порциями. Оптимистично можно предполагать, что размер порции больше одного объекта, что делает возможной пакетную загрузку объектов из БД на стороне очереди, но усложняет код и интерфейс взаимодействия, а также может оказаться потенциально лишней операцией, к примеру, если нужно получить только изменения в идентификаторах, без подгрузки объекта.

Пример интерфейса:

```
// Конструктор конкретной очереди в конкретной базе
func NewQueue(db, qtype, otype uint16) Queue {}
```

```
type Queue interface {
    Ack(uuid.UUID) error
    Pub(time.Time, uuid.UUID, []byte) error
    Sub() (<-chan []byte, error)
    Lost() ([][]byte, error)
}
```



Компромиссный интерфейс, объединяющий оба подхода, но из-за этого менее понятный и избыточный:

```
// Конструктор конкретной очереди в конкретной базе
func NewQueue(db, qtype, otype uint16) Queue {}

type Queue interface {
    Ack(uuid.UUID) error
    Pub(time.Time, uuid.UUID, []byte) error
    PubID(time.Time, uuid.UUID) error
    Sub() (<-chan []byte, error)
    SubIDs() (<-chan uuid.UUID, error)
    Lost() ([][]byte, error)
    LostIDs() ([]uuid.UUID, error)
}
```

### Заключение

В результате исследования была реализована модель для выборки, индексирования объектов и работы с очередями, которая максимизирует скорости работы с неопределенно большими объемами объектов, минимизирует занимаемое место в БД, преодолевает лимиты FoundationDB на длительность и размер транзакций, минимизирует выделение памяти на индексы.

### Список литературы

1. Селиванов П.А., Белов Ю.С. ОБЗОР FOUNDATIONDB // В сборнике избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие»: материалы Международных научных конференций. 2020. С. 107–109.

2. Додонов Г.М., Чумак Б.Б. Динамика перехода от реляционной модели на NOSQL решения // Научный альманах 2018. С. 24–29.

3. Парамонов И.Ю., Смагин В.А., Косых Н.Е., Хомоненко А.Д. Методы и модели исследования сложных систем и обработки больших данных: монография / Под ред. В.А. Смагина и А.Д. Хомоненко. СПб.: Лань, 2020. 236 с.

4. Тарасов С.В. СУБД для программиста // Базы данных изнутри. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 320 с.

5. Эрик Р., Джим Р.У. Семь баз данных за семь недель. Введение в современные базы данных и идеологию NoSQL / Под ред. Ж. Картер; пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2013. 384 с.

6. Маркин Е.И., Рябова К.М., Артюшина Е.А. Современные технологии NOSQL для реализации баз данных. 2017. С. 1240–1243.

7. Григорьев Ю.А., Плутенко А.Д., Бурдаков А.В., Цвященко Е.В. Анализ процессов согласования версий записей в базах данных NOSQL // Радиопромышленность. 2017. С. 125–134.

УДК 620.97

## СИСТЕМА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В МАЛОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ОБРАТНОГО ОСМОСА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Кызыров К.Б., Кокабаева Р.А.**

*Карагандинский технический университет, Караганда, e-mail: raushan-1997@mail.ru*

В данной статье рассматриваются пути повышения энергической эффективности при опреснении морской воды обратным осмосом, которые позволяют решить проблему с нехваткой чистой (питьевой) воды в засушливых регионах. Мембрана обратного осмоса представляет собой полупроницаемую мембрану, которая позволяет отделять растворенные ионы и более крупные растворенные частицы от питательной воды. В сосуде высокого давления используется одинарная мембрана. Система снижает энергопотребление за счет уменьшения размера основного насоса высокого давления. Кроме того, эксплуатационные расходы снижаются за счет повышения давления части опресненной воды в мембране за счет сброса соленой воды из мембраны. Проведена экспериментальная проверка предложенной системы, разработана имитационная модель и проведено сравнение с экспериментальным результатом для проверки системы в различных рабочих условиях. В этом исследовании изучается эффективность установки обратного опреснения воды в сочетании с СРЭ. В качестве системы рекуперации энергии используется теплообменник давления. Была изготовлена установка обратного опреснения воды, которая была подключена к СРЭ через четыре соленоидных клапана высокого давления. Система автоматически управляется с помощью отдельно разработанного блока управления.

**Ключевые слова:** водоснабжение, обратный осмос, мембранная технология, энергическая эффективность, опреснение, восстановление энергии

## ENERGY RECOVERY SYSTEM IN A SMALL REVERSE OSMOSIS DESALINATION PLANT: EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES

**Kyzyrov K.B., Kokabayeva R.A.**

*Karaganda Technical University, Karaganda, e-mail: raushan-1997@mail.ru*

This article discusses ways to improve energy efficiency in seawater desalination by reverse osmosis, which can solve the problem with the lack of clean (drinking) water in arid regions. The reverse osmosis membrane is a semi-permeable membrane that separates dissolved ions and larger dissolved particles from the feed water. The pressure vessel uses a single diaphragm. The system reduces energy consumption by reducing the size of the main high pressure pump. In addition, operating costs are reduced by increasing the pressure of a portion of the desalinated water in the membrane due to the discharge of salt water from the membrane. An experimental check of the proposed system is carried out, a simulation model is developed and a comparison is made with the experimental result to test the system under various operating conditions. This study examines the efficiency of a reverse desalination plant in combination with an EDS. A pressure heat exchanger is used as an energy recovery system. A reverse desalination unit was manufactured, which was connected to the SRP through four high pressure solenoid valves. The system is automatically controlled by a separately developed control unit.

**Keywords:** water supply, reverse osmosis, membrane technology, energy efficiency, esalination, energy recovery

Нехватка питьевой воды, особенно в развивающихся странах, побудила исследователей попытаться решить эту проблему. Опреснение – один из самых эффективных методов решения этой проблемы. Среди методов опреснения обратный осмос (ОО) имеет более высокий приоритет, чем методы термического опреснения, из-за его сравнительно ограниченного потребления энергии. Были внедрены различные методы для повышения производительности опреснительных установок обратного осмоса. В этом исследовании основное внимание уделялось использованию системы рекуперации энергии (СРЭ) для повышения производительности небольшой установки обратного осмоса в удаленных районах. Емкость агрегата составила 2,4 м<sup>3</sup>/день, занятые двумя цилиндрами двустороннего действия, элементы управления которых работают как СРЭ. Экспериментальная установка ис-

пользуется для проверки эффективности предложенного СРЭ.

Имитационная модель спроектирована и реализована, чтобы позволить изменять системные параметры завода. Были представлены и сравнены экспериментальные и модельные результаты различных систем давления. Полученные результаты показали хорошее соответствие значений экспериментальной и имитационной модели. Выделено влияние коэффициента восстановления на энергосбережение. СРЭ сэкономила потребление энергии на 80%. Анализ стоимости небольшой опреснительной установки обратного осмоса с системой СРЭ и без нее был проведен и показал значительное снижение общей стоимости.

Общий объем запасов воды в мире составляет около 1,4 млрд км<sup>3</sup>. 97% этого количества находится в океанах, а 2% хранится в виде льда в полярных регионах. До-

ступный процент пресной воды составляет около 1 %, и она используется для нужд растений, животных и человека [1].

В последние годы подземные воды были загрязнены из-за роста населения, объемов промышленности и сельского хозяйства. Чистая вода – самый ценный ресурс в мире. Опреснение морской и солоноватой воды – важное решение проблемы нехватки питьевой воды в мире. Есть два разных метода получения пресной воды путем опреснения. Первый метод известен как опреснение с фазовым переходом, или метод термического опреснения, а второй – мембранный процесс. В процессе опреснения с фазовым переходом вода переходит из жидкой фазы в пар с использованием тепла и снова возвращается в жидкость за счет конденсации. В природе опреснение с фазовым переходом приводит к дождю, который является основным источником пресной воды на нашей планете.

#### Материалы и методы исследования

Процессы термического опреснения требуют большого количества энергии. Было подсчитано, что для производства  $22 \times 10^6$  м<sup>3</sup> воды в сутки требуется около  $203 \times 10^6$  т нефти в год.

Мембранный процесс зависит от действия движущей силы, такой как градиенты давления, концентрации и температуры. Принцип действия мембранных процессов может быть электродиализным (ЭД) и обратным осмосом (ОО). В электродиализных системах перенос ионов из камеры питательной воды снижает соленость. Соленая вода содержит растворенные соли, разделенные на положительно и отрицательно заряженные ионы. Положительные ионы (катионы) будут двигаться к отрицательному электроду (катоде), а отрицательные ионы (анионы) будут двигаться к положительному электроду (аноду) через мембраны. Система обратного осмоса зависит от свойств полупроницаемых мембран. Эти мембраны используются для отделения воды от со-

леного раствора под высоким давлением. Пресная вода может попасть в отсек рассола под действием осмотического давления. В таблице показаны наиболее важные приемы опреснительных процессов.

Производительность и долговечность одноступенчатого обратного осмоса с морской водой были проанализированы. Исследованы одноступенчатые системы опреснения морской воды при высоких температурах и солености с использованием мембранных модулей обратного осмоса ПЭК-1000 а также оптимизировали работу установок мембранной фильтрации обратного осмоса [2].

Были изучены эффекты конструкции и условий эксплуатации. Кроме того, была разработана упрощенная математическая модель, чтобы показать эффект отторжения одновалентных и двухвалентных ионов. Результаты показали, что производительность можно увеличить на 20%, используя мембраны обратного осмоса для опреснения морской воды. Изучено влияние температуры наружного воздуха и условий влажности почвы на скорость мембранной фильтрации воды. Результаты показали, что при высокой температуре наружного воздуха скорость просачивания воды через мембрану увеличивается. Также при низкой температуре наружного воздуха снижается скорость фильтрации воды.

При высокой влажности почвы скорость просачивания воды через мембрану увеличивалась, а при низкой влажности почвы скорость просачивания воды снижалась. Системы подповерхностного забора для установок обратного опреснения морской воды использовались для улучшения качества воды, сокращения использования химикатов, уменьшения углеродного следа и снижения стоимости производства. Их результаты показали, что общие эксплуатационные расходы установок обратного опреснения морской воды снизились с 5 до 30% при использовании подземных систем забора воды.

#### Процессы опреснения

Процессы фазового перехода	Мембранные процессы
1. Многоступенчатая вспышка (МСВ)	1. Обратный осмос (ОО)
2. Множественное кипячение (МК)	
3. Компрессия пара (ВК) – Механический (MVC) – Тепловой (TVC)	
4. Замораживание	
5. Солнечные кадры – Обычные кадры – Специальные кадры	2. Электродиализ (ЭД)

Исследовали работу опреснительной установки обратного осмоса при различных значениях солености морской воды. В качестве системы рекуперации энергии использовалась турбина Пелтона. Было изучено влияние компонентов системы на экономику и анализ затрат на производительность. По результатам можно сделать вывод, что система достигла максимальной эффективности 5,82%, а стоимость продукта составляет 2,451 долл. США/м<sup>3</sup> при солености исходной воды 35 000 частей на миллион.

Добавление импульсной турбины с турбоагнетателем в качестве системы рекуперации было изучено Грюндишем и Шнайдером, было проанализировано потребление энергии для трех заводов. Было проведено сравнение энергопотребления систем высокого давления и насосов высокого давления. Результаты показали, что потребление энергии 2,58 кВтч/м<sup>3</sup> воды для всей системы питательного насоса высокого давления возможно. Между тем использовали подкачивающий насос в сочетании с турбиной Пелтона в системе опреснения СРЭ для обратного осмоса. Эта СРЭ снизила удельное потребление энергии для опреснительных установок. Также при использовании гидравлического оборудования уменьшается рассеяние энергии, без необходимости дросселировать какие-либо клапаны. Другой СРЭ, в котором используется обменник давления с большим ротором, был разработан Стовером для установок обратного осмоса. Результаты показали, что роторный обменник давления влияет на производительность опреснительных установок. Были изучены различные методы, используемые для снижения потребления энергии. Эти методы включали различные типы теплообменников давления, такие как турбины типа Фрэнсиса, турбины Пелтона и усилители гидравлического давления. Кроме того, были проанализированы и оценены данные нескольких реальных заводов, включая простую партию и простую партию с установками подачи и отбора. Был сделан вывод, что подходят только гидроусилители давления, поскольку они компактны, не требуют обслуживания и доступны в различных размерах. Анализ и принцип работы теплообменника динамического давления, используемого в установках обратного осмоса [3].

Из предыдущих исследований можно сделать вывод, что использование методов мембранного опреснения обратного осмоса очень важно для производства питьевой воды по экономичной цене для отдаленных районов. Это исследование пытается восполнить пробел, связанный с наличием простой, экономичной, легко управляемой,

но эффективной системы СРЭ для использования в удаленных районах.

Предлагаемый СРЭ в сочетании с ОО сравнивается с предыдущими испытаниями с точки зрения эффективности и экономики. Это делается с помощью следующих шагов:

– В эксперименте используется система рекуперации энергии, соединенная с установкой обратного осмоса, и выходящая пресная вода проверяется, чтобы подтвердить пригодность добытой воды для питья.

– Постройте математическую модель и изучите влияние различных параметров на производительность и эффективность установки.

– Сравните экспериментальные результаты и результаты моделирования с предыдущими исследованиями.

– Проверьте наглядность предлагаемой системы с экономической точки зрения.

Текущее исследование предлагает СРЭ, которым легко управлять, с возможностью изменения контроллера для соответствия различным условиям эксплуатации, а также с возможностью производства дешевой пресной воды с использованием небольшой установки обратного осмоса для удаленных районов. Система снижает энергопотребление за счет уменьшения размера основного насоса высокого давления. Кроме того, эксплуатационные расходы снижаются за счет повышения давления части опресненной воды в мембране за счет сброса соленой воды из мембраны. Проведена экспериментальная проверка предложенной системы, разработана имитационная модель и проведено сравнение с экспериментальным результатом для проверки системы в различных рабочих условиях.

В этом исследовании изучается эффективность установки обратного опреснения воды в сочетании с СРЭ. В качестве системы рекуперации энергии используется теплообменник давления. Была изготовлена установка обратного опреснения воды, которая была подключена к СРЭ через четыре соленоидных клапана высокого давления. Система автоматически управляется с помощью отдельно разработанного блока управления. Основные компоненты установки обратного опреснения воды:

– Насос высокого давления (НВД) предназначен для обеспечения оптимального потока, необходимого для мембраны, в зависимости от солености и производительности системы. Тип насоса – плунжерный, медный, с расходом 11,0 л/мин, давлением до 100 бар и мощностью двигателя 2,0 л.с. при частоте вращения 1450 об/мин.

– Насос низкого давления (ННД) используется для обеспечения подачи по-

ложительного давления в насос высокого давления для уменьшения кавитации и зарядки элементов теплообменника давления на такте всасывания. ННД подает 20 л/мин при давлении 4 бара.

– Насос подкачки (НП) используется для повышения давления питательной воды до рабочего уровня ГЭС. Это позволяет передавать на мембрану большую мощность без увеличения мощности ГЭС.

– Реле низкого давления используется в качестве контроллера, который включает и выключает систему, обеспечивая нормальную работу устройства.

Реле высокого давления подключено к нагнетательной линии насоса для защиты стороны высокого давления системы от чрезмерного давления. На рис. 1 показана схема опреснительной установки обратного осмоса с системой рекуперации энергии.

Мембрана обратного осмоса представляет собой полупроницаемую мембрану, которая позволяет отделять растворенные ионы и более крупные растворенные частицы от питательной воды. В сосуде высокого давления используется одинарная мембрана.

Модель мембраны SW30-2540 с активной площадью 2,8 м<sup>2</sup> и расходом 2,6 м<sup>3</sup> в день. Максимальная рабочая температура и давление составляют 45 °С и 69 бар соответственно при перепаде давления 1,0 бар. Сосуд высокого давления из специальной нержавеющей стали используется для поддержания максимального рабочего давления мембраны 70 бар [4].

Патронный фильтр используется для удаления умеренного количества частиц

из жидкостей размером от 50 до 0,035 мкм. Материал фильтрующего картриджа – полипропилен, с расходом 30 л/мин и максимальным рабочим давлением 6 бар, с перепадом давления 0,14 бар. Загрязнения и примеси удаляются с помощью угольного фильтра на основе химической адсорбции.

СРЭ – это элемент обменника давления (ТОД), который имеет два цилиндра двустороннего действия, четыре двухходовых направляющих клапана, четыре обратных клапана и игольчатый клапан. Каждый цилиндр имеет следующие характеристики: длина хода 350 мм, рабочий объем 7,2 л, вес 15 кг, максимальное и минимальное рабочее давление 80 и 3,5 бар соответственно. СРЭ использует рассол под высоким давлением и высокой соленостью, выходящий из мембраны, для повышения давления морской воды. Вместо того чтобы выбрасывать воду под высоким давлением и высокой соленостью с помощью дроссельного клапана, СРЭ использует эту воду для повышения давления морской воды от низкого до значения, близкого к рабочему давлению мембраны. Для управления потоком на входе и выходе на стороне высокого давления используется электромагнитный клапан, управляемый микроконтроллером PIC18F2550.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Клапан имеет максимальное рабочее давление 70 бар. Система управления теплообменником давления состоит в основном из импульсного источника питания 24 В постоянного тока в качестве источника питания.



Рис. 1. Схема опреснительной установки обратного осмоса с использованием системы рекуперации энергии

Морская вода используется для подпитки системы опреснения обратного осмоса. Вода поступает в насос низкого давления, который повышает давление до 4 бар. Реле низкого давления делит нагнетание на два пути. Первый путь входит в насос высокого давления, который повышает давление заборной воды до желаемого давления в системе в зависимости от характеристик воды. Слив от насосов высокого давления подается в мембранный напорный резервуар. Этот процесс дает 10% от общего расхода, который поступает в резервуар в качестве доочистки пермеата угольным фильтром. Остальные 90% используются как рассол высокого давления и высокой солености (ВДВС) под давлением в системе и регулируются электромагнитными клапанами. Второй путь используется для зарядки элементов ТОД на такте всасывания и регулируется через задвижку, подключенную к расходомеру. СРЭ имеет два хода для каждого цилиндра, и каждый цилиндр работает попеременно, как показано на рис. 2.

Во время такта всасывания неочищенная морская вода поступает в элемент ТОД под давлением 4 бар и расходом 12 л/мин. Другая сторона поршня питается рассолом и соединена с атмосферным давлением, а дроссельная заслонка используется

для регулирования потока. В ходе нагнетания рассол под высоким давлением попадает в элемент ТОД, который заполняется неочищенной морской водой, позволяя воде проходить через дроссельный клапан с давлением нарастания сопротивления ниже, чем давление рассола на 4 бара, при расходе 12 л/мин.

В конце каждого хода подачи направление движения противоположно, чтобы изменить путь рассола к другому элементу и соединить линию разгрузки с элементом, завершившим ход подачи [5].

Было установлено, что соленость пермеатной воды составляет 400 частей на миллион. Весь пермеат и отклоненный поток сливаются обратно в один и тот же питающий резервуар, система работает по замкнутому циклу из-за отсутствия линии подачи на площадке эксперимента. Давление в системе регулируется с помощью дроссельной заслонки на линиях подачи ТОД, а скорость всасываемого потока регулируется дроссельной заслонкой на сливе рассола. Перед началом экспериментов компоненты опреснительной установки обратного осмоса были собраны и подключены с использованием соответствующих соединений высокого и низкого давления на экспериментальной площадке.

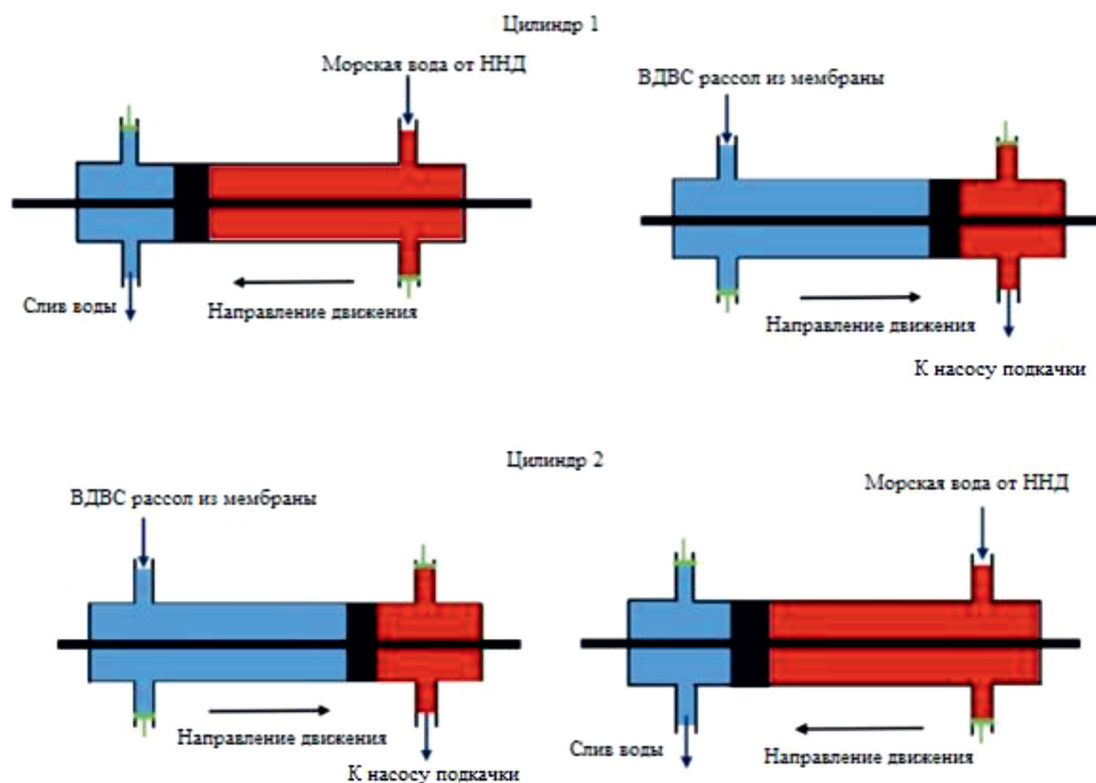


Рис. 2. Принципиальная схема двух цилиндров теплообменника давления

Опреснительная установка была испытана при различных давлениях от 10 до 60 бар, каждый раз увеличивая давление на 5 бар. Все данные о расходе рассола и давлениях записывались одновременно. Эффективность нагнетательного теплообменника рассчитывалась как отношение давления рассола к давлению подачи нагнетательного обменника.

$$\eta_{\text{тод}} = \frac{\rho_F \cdot P_d}{\rho_b \cdot P_b},$$

где  $\rho_F$  – плотность морской воды в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $P_d$  – давление подачи в Па,  $\rho_b$  – плотность рассола в  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а  $P_b$  – давление рассола в Па.

Энергосбережение – это разница в мощности, потребляемой с СРЭ и без нее, и рассчитывается следующим образом:

$$\text{Энергосбережение} = [W_{\text{нвд}} - (\eta_{\text{тод}} \times P_b \times (1 - RR) \times Q_F)] - W_{\text{пн}},$$

где  $W_{\text{нвд}}$  – мощность насоса высокого давления,  $\eta_{\text{тод}}$  – КПД теплообменника давления,  $RR$  – коэффициент извлечения мембраны и представляет собой соотношение между расходом пермеата и расходом исходного материала,  $Q_F$  – расход исходного материала в  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $W_{\text{пн}}$  – мощность подкачивающего насоса. Мощность насоса высокого давления и подкачивающего насоса рассчитывается следующим образом:

$$W_{\text{нвд}} = \Delta P_{\text{вд}} \times Q_{\text{вд}} / \eta_{\text{вд}},$$

$$W_{\text{вд}} = \Delta P_{\text{вд}} \times Q_{\text{пн}} / \eta_{\text{пн}},$$

где  $\Delta P_{\text{вд}}$  и  $\Delta P_{\text{пн}}$  – перепады давления в насосе высокого давления и в подкачивающем насосе,  $Q_{\text{вд}}$  и  $Q_{\text{пн}}$  – скорости потока насоса высокого давления и подкачивающего насоса, соответственно,  $\eta_{\text{вд}}$  и  $\eta_{\text{пн}}$  – КПД насоса высокого давления и подкачивающего насоса соответственно.

## Заключение

Значения КПД НВД и ПН экспериментально составили 80% и 70% соответственно. Количество энергии, используемой подкачивающим насосом для повышения скорости потока рассола до рабочего давления мембраны, намного меньше энергии, сэкономленной в насосе высокого давления.

Производительность установки повышается за счет добавления СРЭ для использования рассола высокого давления, выделяемого из потока отвода мембраны. Было замечено, что чем ниже коэффициент восстановления, тем больше экономится энергии. Энергосбережение может достигать 80% при коэффициенте восстановления 10%. При сравнении результаты экспериментов и моделирования показали лишь незначительные различия. Экономический анализ показал, что СРЭ снизит стоимость производства пресной воды до 65% от ее стоимости при использовании установки с суточной производительностью 12  $\text{м}^3$ . Этот коэффициент увеличивается до 78%, когда ежедневная производительность завода составляет 100  $\text{м}^3$ .

## Список литературы

1. Как утеплить аккумулятор на зиму своими руками? [Электронный ресурс]. URL: <https://akbzona.ru/stati/uteplitel-dlya-akkumulyator> (дата обращения: 22.03.2021).
2. Эксплуатация автомобильного аккумулятора: работоспособность, неисправности и уход. [Электронный ресурс]. URL: <https://avtonov.info/ekspluatacija-avtomobilnogo-akkumuljatora> (дата обращения: 22.03.2021).
3. Особенности зимней эксплуатации АКБ. [Электронный ресурс]. URL: <https://220volt.com.ua/news/useful/akkumulyatornie-batarei/osobennosti-zimnej-ekspluatatsii-akb.html> (дата обращения: 22.03.2021).
4. Аккумуляторная батарея с автоматическим внутренним подогревом // Патент России № 2398315. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Транспорт», опубл. 27.08.2010 г.
5. Бухтояров И.В., Бухтояров В.Ф. Устройство для автоматического подогрева аккумуляторной батареи в зимнее время // Патент РФ № 2672948. Патентообладатели Бухтояров И.В., Бухтояров В.Ф. 2018. Бюл. № 31.

УДК 551.46.09

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АВТОНОМНЫХ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПРИДОННЫХ СТАНЦИЙ****Лискин В.А., Тихонова Н.Ф., Руссак Ю.С.***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru*

Основной задачей исследований являлось создание научно-технической базы по разработке, созданию и натурным испытаниям комплекса придонных станций нового поколения. Проведены анализ, обоснование и выбор конструктивных и функциональных схем комплекса станций, включающих блок измерения гидрофизических параметров и гидрохимический блок, для измерения параметров химического массообмена на поверхности раздела «вода – дно». Обоснованы и выбраны функциональные схемы микрокомпьютерной системы управления океанологическими датчиками и системы накопления данных гидрофизического блока. Проведены разработка и обоснование функциональной и принципиальной схем базового измерительного модуля, на основе микропотребляющих процессоров, в том числе устройства измерения аналоговых параметров. Определены оптимальные конструкторско-технологические решения чувствительных элементов датчиков температуры морской воды, давления, электропроводности и кислорода. Выполнена разработка и обоснование функциональной схемы акустического измерителя скорости и направления течения, на основе анализа современных методов измерения вектора скорости потока и сравнения различных акустических методов: импульсного, фазового и частотного. Выполнена оценка возможных погрешностей и проведен выбор оптимальных методов их преодоления. Разработан вариант системы цифровой гидроакустической связи с автономными приборами. Сделан выбор оптимальных методов для передачи команд (медленная связь) и передачи данных (быстрая связь) на основе анализа современных методов помехоустойчивой связи в морской среде. Выполненные исследования позволили создать научно-техническую базу для дальнейших разработок и натурных испытаний комплекса донных станций.

**Ключевые слова:** комплекс, станций, придонных, гидроакустическая, связь, глубоководные, эксперименты**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A COMPLEX OF AUTONOMOUS HYDROLOGICAL-HYDROCHEMICAL BOTTOM STATIONS****Liskin V.A., Tikhonova N.F., Russak Yu.S.***Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru*

The main objective of the research was to create a scientific and technical base for the development, creation and full-scale testing of a complex of new generation bottom stations. The analysis, justification and selection of structural and functional diagrams of the complex of bottom stations, including a unit for measuring hydrophysical parameters and a hydrochemical unit, for measuring the parameters of chemical mass transfer at the water-bottom interface, have been carried out. The functional schemes of the microcomputer control system for oceanological sensors and the data storage system of the hydrophysical unit are substantiated and selected. The development and justification of the functional and circuit diagrams of the basic measuring module based on micro-consuming processors, including a device for measuring analog parameters, has been carried out. The optimal design and technological solutions of the sensitive elements of the sensors for temperature of seawater, pressure, electrical conductivity and oxygen are determined. The development and justification of the functional diagram of an acoustic velocity and directional flow meter has been carried out, based on an analysis of modern methods for measuring the flow velocity vector, and comparing various acoustic methods: pulse, phase, and frequency. An assessment of possible errors is made and a selection of optimal methods for overcoming them is made. A version of a digital sonar communication system with autonomous devices has been developed. The choice of optimal methods for transmitting commands (slow communication) and data transmission (fast communication) is made, based on the analysis of modern methods of noise-immune communication in the marine environment. The studies performed allowed us to create a scientific and technical base for further development and field testing of the complex of bottom stations.

**Keywords:** complex, stations, bottom, sonar, communication, deep-sea, experiments

В настоящее время измерения гидрологических (океанологических), гидрофизических и гидрохимических параметров в толще воды морей и океанов, а также процессов химического массообмена на поверхности раздела «вода – дно» выполняются различными типами придонных комплексов, которые принципиально не могут совмещаться. Первые представлены в основном такими станциями, как, например, CTD-F фирмы «Chaisea Technologies Group», CTD-S4 фирмы «Inter Ocean Systems, inc» и VCM-60 фирмы «General

Oceanics». Вторые представлены так называемыми «лендерами», например, Гетеборгского университета. Предлагается подход построения ряда придонных станций на основе базовых измерительных комплексов, включающих помимо датчиков параметров среды измерительные схемы, микропроцессоры и микроконтроллеры, что позволит повысить надежность работы, оперативно изменять конфигурацию комплекса станций в соответствии с возникающими задачами измерений, упростить процесс калибровки каналов измерения.



*Структура комплекса донных станций*

В процессе проводимых в Институте океанологии РАН исследований предложено совместить несколько типов станций в едином комплексе. При этом такие станции предлагается выполнить из трех совместимых, но самостоятельных изделий:

– блока исследования гидрологических (скорость и направление течения и др.) данных (рисунок, А);

– гидрохимического блока для измерения параметров химического массообмена на поверхности раздела «вода – дно» с соответствующими специфическими устройствами и датчиками (рисунок, Б);

– блока измерения гидрофизических параметров в толще воды и в придонном слое (рисунок, В).

Такая схема существенно упрощает и удешевляет создание комплекса донных станций, повышает их надежность (стоимость современных «лендеров» (гидрохимическое направление) превышает 100 000 \$), а для их постановки требуется специальное оборудование. В процессе исследований создания комплекса выполнен анализ достоинств и недостатков существующих автономных станций и обоснованы требования как к конструкции, так и к функционированию комплекса станций.

Основными требованиями являются:

– высокая надежность работы, постановки и подъема комплекса донных станций;

– максимально возможная простота изготовления, калибровки, подготовки к постановке, постановки, съема информации и подъема;

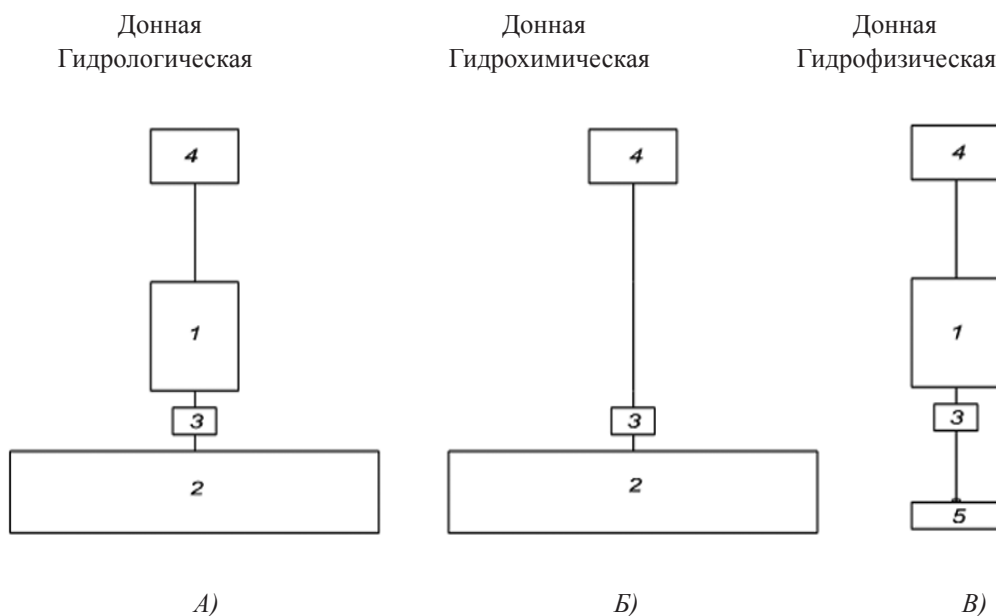
– минимально возможные размеры и вес;

– минимально возможная стоимость изготовления и эксплуатации;

– удовлетворение международным требованиям по точности измеряемых параметров.

Базовые требования по диапазону и погрешностям измеряемых параметров приведены в таблице. Эти требования и параметры могут дополняться и корректироваться в соответствии с разработками современных измерителей и датчиков.

Высокая надежность работы и гибкость перестройки состава и структуры комплекса станций определяется модульным принципом построения и использованием микрокомпьютерных технологий с цифровыми твердотельными накопителями информации. Качество постановки и функционирования комплекса в основном связано с наличием гидроакустического канала считывания данных, что позволит дистанционно оценивать качество постановки и функционирования. Надежность всплытия комплекса предполагается обеспечить тройным дублированием размыкающей системы (гидроакустический канал связи, гидроакустический канал размыкателя и таймер) и двойным дублированием исполнительного механизма размыкания.



*Варианты компоновки модулей и блоков комплекса донных станций. На рисунке обозначено: 1 – блок океанологических, гидрофизических модулей; 2 – гидрохимический блок; 3 – размыкатель троса; 4 – плавучесть; 5 – якорь*

## Базовые требования по диапазону и погрешностям измеряемых параметров

1. Параметры гидрофизического блока	Величины параметров
Давление, бар/%FS	0-100/0,1
Температура, °C	-2+40/0,005
Электропроводность, мСм/м	1,2-72/0,005
Растворенный кислород, O <sub>2</sub> , мл/л	0-12/0,25
2. Параметры гидрохимического блока	
pH, ед.	2-12/0,05
Растворенный метан, CH <sub>4</sub> , мл/л	0-30/0,01
3. Параметры гидрологического блока	
Направление течения, град	0-360/2
Скорость течения, см/с	0-500/2

Простота компоновки и калибровки каналов измерения обеспечивается их исполнением в виде отдельных измерительных модулей с цифровым выходом, объединенных общей шиной данных. Физически общая шина располагается в центральном модуле-коллекторе. Измерительная часть помещена в цилиндрические легкоъемные стальные модули-корпуса, которые стыкуются с коллектором и устанавливаются на каркасе станции. Коллектор имеет до 8 стыковочных узлов. Съём измеренных и частично обработанных данных осуществляется по гидроакустическому каналу. Оптимальные весогабаритные показатели комплекса обеспечиваются его конструктивными особенностями, связанными с современными материалами корпуса и плавучестей, а также возможностью оснащения комплекса перед его постановкой только необходимыми измерительными блоками. Размер корпуса и размещение на нем плавучестей выбираются так, чтобы обеспечить вертикальное нахождение комплекса в поверхностном слое, что необходимо для работы радио и светового маяка при состоянии волнения моря до трех баллов включительно. Предусматривается использование отечественных измерительных датчиков океанологических параметров, чувствительные элементы которых располагаются на одном уровне на корпусе комплекса, чтобы измеренные значения соответствовали методикам анализа и обработки не только синоптической и мезомасштабной, но и мелкомасштабной структуры водных масс [1, 2].

*Функциональная схема комплекса*

Проведение экспериментальных исследований по измерению, сбору, анализу и дистанционному считыванию параметров придонного слоя обеспечивается специальными аппаратно-программными средства-

ми. Они выполняют отбор проб придонной воды и хранение образцов в специальных камерах, работу селективных электродов и работу других измерительных схем. Оперативное управление работой комплекса и другие функциональные линии контролируются, отслеживаются и записываются микрокомпьютерной системой. Экспериментальные блоки отбора проб, включающие шприцевые пробоотборники, а также функциональные схемы предварительного анализа полученных образцов, имеют небольшие габариты, значительные объемы твердотельной памяти, обладают возможностью гибкой программируемости.

Основными измерительными элементами комплекса, наряду со шприцевыми пробоотборниками, являются электроды (выполняющие функции датчиков), из которых наиболее подходящими к применению являются кислородные электроды, а также электроды для измерения величин pH, Eh, H<sub>2</sub>S. Для измерения потоков кислорода предполагается применять оптоды-сенсоры, основанные на волоконной оптике. Более доступными сенсорами кислорода являются системы, применяющие электроды Кларка. Однако при этом существует весьма сложная зависимость показаний этих электродов от концентрации кислорода, температуры, pH, солености, гидростатического давления и скорости перемешивания. В этом случае следует применять компьютерные модели, позволяющие учитывать эти факторы в ходе измерений динамики изменчивости кислорода в камерах донных станций. Наиболее важным фактором, обуславливающим химический обмен на границе вода – дно, является скорость движения придонной воды. От этого зависит толщина диффузионного подслоя на поверхности дна, действующего в качестве барьера между осадком и придонной водой, который определяет скорости потоков через поверхность дна. В этой

связи важно знать не только абсолютное значение скорости придонного течения, но и разницу в гидродинамическом режиме придонного слоя воды и воды, заключенной в камерах донных станций. Для измерений скорости и направления течений предполагается использовать в составе гидрофизического блока ультразвуковой измеритель скорости и направления течения. Для учета разницы в гидродинамике внутри камер и в окружающей среде планируется применить специальные вещества (гипс, гидрохинон и т.д.), скорость растворения которых зависит от скорости движения вод. Движение воды внутри камер гидрохимического блока обеспечивается перемешивающими устройствами, имитирующими гидродинамику окружающей придонной воды. Различные типы мешалок следует приспособить к измеряемым условиям (скорость вращения, форма и размер камеры, расположение лопастей, циркуляционная система). Выбор условий перемешивания ведется экспериментально в лабораторных условиях [3, 4].

#### *Основные блоки*

Гидрохимический блок включает:

- несущую металлическую раму с установленными на ней камерами (боксами), опускаемую с судна на морское дно на тросе или в свободном падении (тонкая балансировка механической конструкции, возможен парашют);
- края боксов погружаются в донные отложения, верхняя часть боксов снабжена крышкой, закрывающейся после постановки на дне;
- моторы для перемешивания воды в боксах, имитирующие придонную гидродинамику;
- блок шприцев для отбора проб придонной воды из боксов, планируется электромеханическая система отбора.

Гидрохиноновый блок:

- это система, позволяющая корректировать разницу в гидродинамике внутри боксов в соответствии с наружной гидродинамикой.

Гидрофизический блок:

- включает измерители температуры, солености, гидростатического давления, также систему электрохимических датчиков гидрофизического блока, в том числе  $O_2$ , величины pH и, возможно, других компонентов солевого состава.

Вспомогательные подсистемы:

- подсистемы измерения, считывания и передачи электрических сигналов с датчиков в блок накопления информации;
- подсистемы программного и операционного обеспечения работы отдельных

систем станции, включая работу моторов, шприцев и т.д.;

- подсистема акустического обеспечения работы станции, включая передачу информации на борт судна, работу размыкателей и т.д.

Система спуска – подъема:

- прорабатывается вариант самовсплывающей станции, что реализуется с помощью блоков плавучести и акустических размыкателей.

Рассмотрим более подробно структуру гидрохимического блока и подходы к его реализации. Конструктивная схема блока базируется на монтаже на единой металлической раме отдельных модулей, функционально обеспечивающих работу комплекса. Эти модули являются самостоятельными единицами, работа которых настраивается и калибруется заранее в условиях лаборатории на берегу или на судне и затем монтируется в единую систему блока, контролируемого центральным операционным микрокомпьютером. Были проработаны вопросы разработки конструкции блока в целом и монтажа отдельных элементов в комплекс, вопросы активации комплекса перед началом работ и опускания его в водной толще, установке на дне, вопросы дистанционного управления работой комплекса и его подъема. Применяемые материалы обеспечивают минимальный вес комплекса и его механическую прочность. Это алюминий и нержавеющая сталь, а также возможно применение титана, стекловолокна, волокон типа кевлара.

Отметим, что модульный принцип реализации облегчает и ускоряет замену одного или нескольких элементов конструкции и сокращает время перестановок станций и монтажа в ходе экспериментальных работ. Одновременно решается проблема загрязнения отдельных частей станции, включая измерительные камеры, шприцы, электроды, мешалки и т.д., которые в ходе сборки-разборки могут быть легко промыты водой.

#### *Блок пробоотборников*

Блок пробоотборников предназначен выполнять следующие функции: по сигналу от управляющего контроллера должна отбираться проба воды из рабочего бокса и бокса сравнения, объемом, достаточным для проведения в этой пробе всех анализов. Часть окружающей воды должна попасть при этом в бак для компенсации разряжения. Количество отбираемых проб за время постановки должно составлять от 5 до 12. Известны системы пробоотбора, использующие в качестве рабочих элементов пластиковые шприцы, закрепленные на массивном

основании, срабатывающие под действием упругого элемента, например пружины. Также входит в состав система спусковых устройств и управляющая система, обеспечивающая срабатывание шприцев в нужный момент времени. На основе проведенного анализа преимуществ и недостатков различных систем выбрана система пробоотбора, базирующаяся на пластиковых шприцах большого объема (150 мл), что является основным отличием от известных зарубежных систем, использующих шприцы малого объема. Основная решаемая задача состояла также в возможности модификации узлов для обеспечения срабатывания шприцев большого объема.

Предложена следующая функциональная схема блока пробоотбора:

- прямоугольное основание с опорными рейками для крепления рабочих шприцев;
- пружины с устройством крепления к подвижным штокам шприцев и к неподвижной рейке, закрепленной на основании;
- система взвода – спуска, включающая в себя подпружиненные упорные штоки, рычаги и сегментные опорные шайбы, размещенные на вращающейся оси;
- вращающаяся ось с опорными сегментными шайбами и передаточной звездочкой для связи с управляющим мотором;
- управляющий (шаговый) мотор, с редуктором и микросхемой управления, размещенные в герметичном корпусе, связанном по давлению путем заполнения корпуса силиконовым маслом и применении подвижной резиновой мембраны.

Таким образом, была разработана функциональная схема блока пробоотборников для океанологического и гидрохимического блоков, создан его макет и проведены лабораторные испытания, которые подтвердили достижимость заложенных в программе разработок параметров. В дальнейшем, предполагается перевод блока мотора с редуктором на отечественные комплектующие, разработку оптимальных способов крепления блока пробоотборников на рабочую раму и подсоединения шприцев гибкими шлангами к выходным штуцерам рабочих баков.

#### *Система цифровой гидроакустической связи*

В общем случае цифровая гидроакустическая связь подводного комплекса должна состоять из двух систем: системы телеуправления и системы передачи данных. Система телеуправления обладает сравнительно небольшой производительностью, но сохраняет работоспособность в широком диапазоне изменений характеристик гидро-

акустического канала и имеет малое энергопотребление. Система передачи данных обладает значительно большей производительностью и при этом имеет повышенную чувствительность к характеристикам гидроакустического канала. Для разработки системы гидроакустической связи и дистанционного считывания информации было проведено моделирование корреляционного метода передачи гидроакустических сигналов. Моделирование производилось с помощью комплекса программ, в которые входят: пакеты генерации излучаемых сигналов, пакеты моделирования многолучевости и доплеровских смещений, а также программы обнаружения передаваемой информации, использующие определение импульсного отклика параметров гидроакустического канала и когерентного суммирования многолучевых доплеровских сигналов. На основе модельных расчетов был разработан и испытан в натурных условиях макет системы гидроакустической связи. В процессе испытаний было установлено, что разработанная система гидроакустической связи обеспечивает устойчивый обмен информацией с автономной донным комплексом на расстоянии до трех морских миль. Оценка отношения сигнал/шум при расстоянии между донным комплексом и судном в три мили показала, что разработанная система гидроакустической связи способна обеспечивать передачу информации при расстоянии по крайней мере в 2–3 раза большем. В целом испытания системы гидроакустической связи показали, что она пригодна для обеспечения надежного обмена цифровой информацией с автономными подводными аппаратами на значительных расстояниях, в условиях многолучевого распространения звука и при чрезвычайно низком энергопотреблении приемной части системы (3–7 мВт в зависимости от напряжения источника питания) [5–7].

#### **Заключение**

Результаты разработки и испытаний макетов базовых измерительных комплексов на основе современных микропотребляющих процессоров и универсальных интерфейсов показывают правильность выбранного подхода модульного построения и принятой универсальной элементной базы, что позволит в последующие годы создавать и модифицировать комплексы с характеристиками, удовлетворяющими новым требованиям. Проведенные исследования и анализ методов и схем измерения скорости и направления течений показали, что фазовые измерители скорости потока

имеют значительно более простые приёмопередающие узлы, но мощность излучения значительно ниже по сравнению с доплеровскими измерителями. Выбор метода измерения потока в основном связан с простотой конструкции датчика и его низким энергопотреблению, что важно в случае использования датчика скорости потока в составе автономного комплекса. При этом фазовый метод реализуется при достаточно простой конструкции электронной части, так как в этом случае нет необходимости компенсировать паразитную амплитудную модуляцию, а фазо-частотные характеристики приёмопередающего тракта могут быть калиброваны на фиксированных частотах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (темы № 0128-2021-0010) при поддержке РФФИ (проекты № 20-05-00384 «А» и № 18-05-60070 «Арктика»).*

#### Список литературы

1. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
2. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Ключев М.С., Евсенок Е.И. Высокорастворимая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // *Процессы в геосредах*. 2016. № 2. С. 156–161.
3. Колосов К.В. Комбинированные гидроакустические приборы подводных аппаратов // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XIII Международной научно-технической конференции «МСОИ-2013»*. М., 2013. Т. 1. С. 369–372.
4. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 446. № 13. С. 330–335.
5. Егоров А.В., Римский-Корсаков Н.А., Рожков А.Н., Белевитнев Я.И. Опыт использования лондера ИО РАН в прибрежных водах Черного моря // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017»*. М., 2017. Т. 1. С. 323–326.
6. Karagianni Evangelia A. Electromagnetic Waves under Sea: Bow-Tie Antenna Design for Wi-Fi Underwater Communications. *Progress In Electromagnetics Research*. Moscow, 2015. Vol. 41. P. 189–198.
7. Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А., Рогинский К.А. Особенности конструирования широкополосных кабельных донных сейсмостанций для мониторинга нефтегазовых месторождений // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017»*. М., 2017. Т. 1. С. 223–227.

## РАЗРАБОТКА ПРОФОРИЕНТАЦИОННОЙ VR-ИГРЫ НА ПЛАТФОРМЕ UNITY

**Сергеев Е.С., Сухова А.Е., Максимов И.С., Сенаторов Н.А.**

*ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,  
Чебоксары, e-mail: akaevgeniy@rambler.ru*

В статье рассматриваются вопросы разработки игры с использованием технологий виртуальной реальности. Работа содержит описание основных этапов разработки игрового приложения, к которым относится создание трехмерных моделей для игрового мира и разработка игровой логики. Реализация VR-игры производилась средствами специализированного программного обеспечения для создания трехмерной графики и компьютерных игр: Blender и Unity. Данная игра представляет собой трехмерный образовательный и познавательный квест для ознакомления с новейшими технологиями, структурной организацией и факультетами вуза. Моделирование и текстурирование в данной работе производились в открытом программном обеспечении для создания трехмерной (3D) графики Blender. В общем виде разработка моделей может быть поделена на два этапа: 1) моделирование, 2) UV-развертка и текстурирование. Разработанные трехмерные модели были перенесены на игровой движок Unity. В среде Unity для работы с виртуальной реальностью была использована библиотека Steam VR. На данный момент игровое приложение прошло успешное тестирование на базе HTC Vive Pro. Разработанное приложение может быть расширено дополнительными игровыми мирами, возможна реализация для конкретных вузов. Результаты данной работы могут быть использованы для популяризации новейших информационных технологий и технического образования в целом.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, VR, Unity, компьютерная игра, профориентация, трехмерное моделирование, игровое приложение

## DEVELOPMENT OF A PROFORIENTATION VR GAME ON THE UNITY PLATFORM

**Sergeev E.S., Sukhova A.E., Maksimov I.S., Senatorov N.A.**

*Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, e-mail: akaevgeniy@rambler.ru*

The article deals with the development of a game using virtual reality technologies. The work contains a description of the main stages of developing a game application, which include the creation of three-dimensional models for the game world and the development of game logic. The implementation of the VR game was carried out by means of specialized software for creating three-dimensional graphics and computer games: Blender and Unity. This game is a three-dimensional educational and cognitive quest to get acquainted with the latest technologies, structural organization and faculties of the university. Modeling and texturing in this work were carried out in open source software for creating three-dimensional (3D) graphics Blender. In general, the development of models can be divided into two stages: 1) modeling, 2) UV-scanning and texturing. The developed 3D models were transferred to the Unity game engine. In the Unity environment, the Steam VR library was used to work with virtual reality. At the moment, the game application has been successfully tested on the basis of the HTC Vive Pro. The developed application can be extended with additional game worlds, implementation for specific universities is possible. The results of this work can be used to popularize the latest information technologies and technical education in general.

**Keywords:** virtual reality, VR, Unity, computer game, career guidance, three-dimensional modeling, game application

С каждым годом индустрия компьютерных игр развивается со все большим размахом. С развитием новейших технологий, таких как виртуальная и дополненная реальность, мобильные технологии, большие данные, Интернет вещей, игровая индустрия приобретает другие возможности [1–3]. Но вместе с тем игры редко используются в образовательных и познавательных целях, чаще просто имитируются те или иные миры, выполняя условия, в которых игрок достигает победы. Таким образом, можно отметить актуальность разработки компьютерных образовательных, информационных и познавательных игр [4]. В данной работе рассматриваются вопросы разработки образовательной игры, которую можно применить в познавательных и про-

фориентационных целях. Целью работы является разработка игры виртуальной реальности (VR) для использования в профориентационных целях и популяризации перспективных информационных технологий среди абитуриентов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары).

Разработка VR-игры в данном случае обусловлена необходимостью привлечения внимания абитуриентов к новейшим информационным технологиям, так как данное направление поддерживается на государственном уровне. Проект актуален для использования в выездных и проводимых на территории университета профориентационных мероприятиях. Использование VR-очков в мероприятиях с абитуриентами ФГБОУ ВО «ЧГУ им.

И.Н. Ульянова» показало высокую эффективность. Так, например, появилось больше желающих освоить эти технологии в рамках направления подготовки «Прикладная информатика в дизайне» по сравнению с 2019 г., конкурс на данное направление вырос с 4,2 человека на место до 4,9 (в данном случае необходимо учитывать и особенности приемной кампании 2020 г. с электронной подачей документов в условиях пандемии) [5]. Несмотря на то, что виртуальная реальность востребована среди абитуриентов, у университета на данный момент нет собственных авторских разработок в этом направлении.

Разрабатываемая в данной работе VR-игра является виртуальным квестом, в котором представлены факультеты университета. В процессе прохождения игрового приложения игрок получает сведения о факультетах, об организации высшего образования в целом. Следует отметить, что данная игра не является виртуальной экскурсией с представлением моделей реально существующих учебных аудиторий вуза, так как в качестве комнат с факультетами представлены своеобразные квесты.

#### Материалы и методы исследования

Далее в работе приводятся основные этапы разработки VR-игры. После написания сценария игры и создания первых референсов, целесообразно начинать этап моделирования и текстурирования. Моделирование и текстурирование в данной работе производились в открытом программ-

ном обеспечении для создания трехмерной (3D) графики Blender. В общем виде разработка моделей может быть поделена на два этапа: 1) моделирование, 2) UV-развертка и текстурирование [6]. На первом этапе были созданы виртуальное окружение и модели в каждой из комнат при помощи полигонального моделирования в стиле Low poly. Данный прием позволяет оптимизировать производительность даже при низких характеристиках устройства и дает возможность использования моделей в приложениях реального времени (в том числе и в VR-играх). Данная технология трехмерной графики применяется в различных VR-тренажерах и полностью соответствует предъявляемым требованиям. На рис. 1 представлена модель медицинского факультета в окне программы Blender.

На следующем этапе производились UV-развертка и текстурирование. На данном этапе на созданные ранее 3D-модели накладываются текстуры, производится преобразование (развертка), то есть соотносятся координаты на поверхности моделей и на текстуре. Почти у каждого полигона модели отдельный цвет, такой подход позволяет использовать один атлас цветов для текстурирования всего уровня. На рис. 2 представлен этап текстурирования комнаты с радиотехническим факультетом в программе Blender. Все локации VR-игры выдержаны в одном стиле, на этапе текстурирования дополнительно производилась оптимизация по цветовым характеристикам.



Рис. 1. 3D-модель медицинского факультета

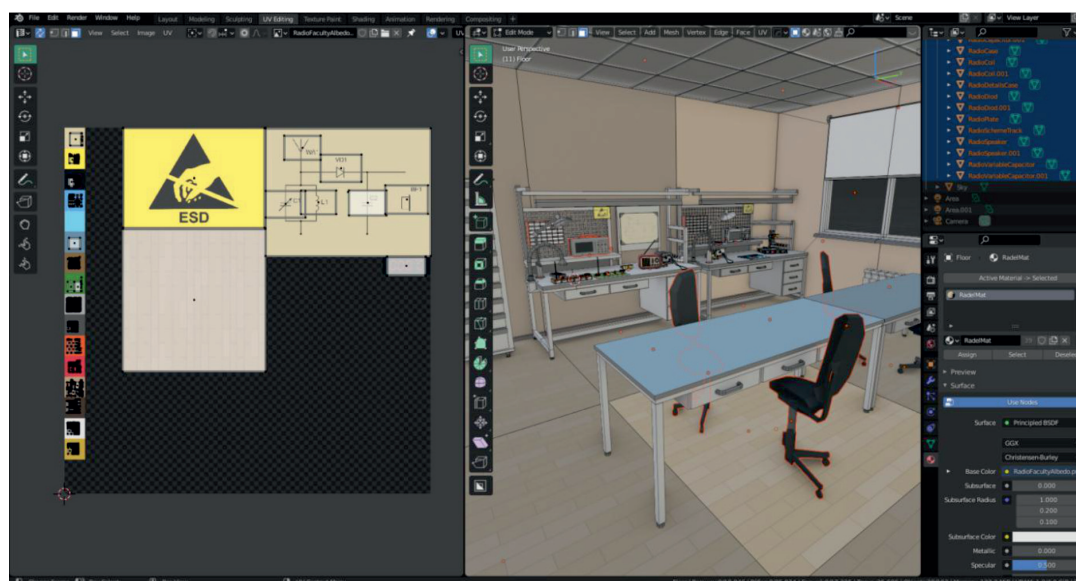


Рис. 2. Текстурирование в Blender

Так же до перехода к этапу разработки игровой логики был создан игровой персонаж, который является своеобразным помощником и подсказчиком по игре. Были проделаны риггинг (создание скелетной основы персонажа) и анимация в Blender.



Рис. 3. Модель игрового персонажа

Разработанные трехмерные модели были перенесены на игровой движок Unity.

Данный игровой движок представляет собой межплатформенную среду разработки компьютерных игр и поддерживает возможность создания VR. Для переноса разработанных трехмерных моделей необходимо создать проект Unity с подключением к VR и загрузить в папку Assets файлы с моделями. В итоге в обозревателе решений в программе Unity появляются соответствующие папки и файлы для каждой комнаты.

В среде Unity необходимо загрузить библиотеку Steam VR. Данная библиотека содержит в себе скрипты для игрока и для создания платформ, по которым может ходить игрок [7]. Каждая комната в игре является заданием с прохождением. Например, в комнате с медицинским факультетом игроку нужно собрать скелет человека. Для реализации такой игровой логики необходимо написать скрипты, обеспечивающие физические свойства моделям, и предусмотреть реализацию порядка сбора модели. Скрипт, при помощи которого реализована возможность взаимодействия с предметами, выглядит следующим образом:

```
protected virtual void OnDetachedFromHand(Hand hand)
{
    attached = false;
    onDetachFromHand.Invoke();
    hand.HoverUnlock(null);
    rigidbody.interpolation = hadInterpolation;
    Vector3 velocity;
    Vector3 angularVelocity;
    GetReleaseVelocities(hand, out velocity, out angularVelocity);
    rigidbody.velocity = velocity;
    rigidbody.angularVelocity = angularVelocity;
}
```



В данном коде использован метод для поднятия предметов при помощи джойстика. При выделении джойстиком предмета срабатывает следующий метод, реализованный в виде скрипта:

```
protected virtual void OnHandFocusAcquired( Hand hand )
{
    gameObject.SetActive( true );

    if (velocityEstimator != null)
        velocityEstimator.BeginEstimatingVelocity();
}
```

Уже перенесенные модели медицинского факультета после запуска игры в Unity выглядят следующим образом (рис. 4).

После запуска игры игрок попадает в главную комнату, от которой можно перейти к разным факультетам. При использовании в VR-шлеме для перехода по игровому пространству используется метод телепорта посредством джойстика. Для перемещения по игровому пространству было добавлено несколько областей (рис. 5).

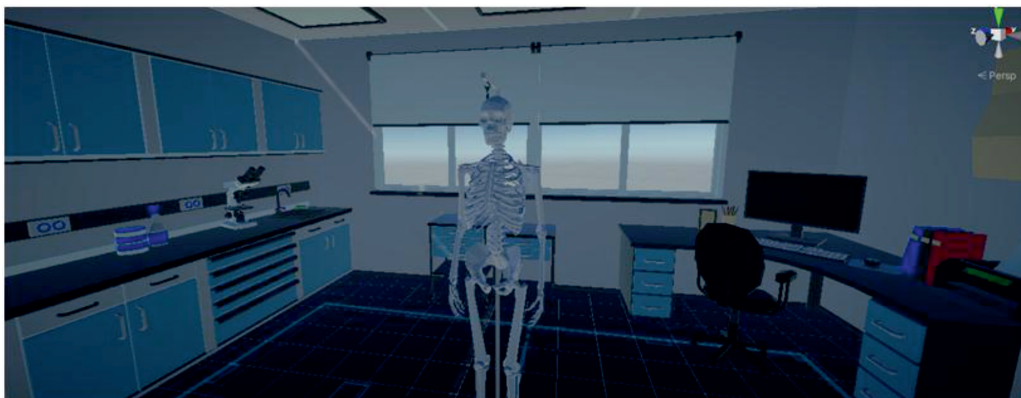


Рис. 4. Игровое пространство в Unity

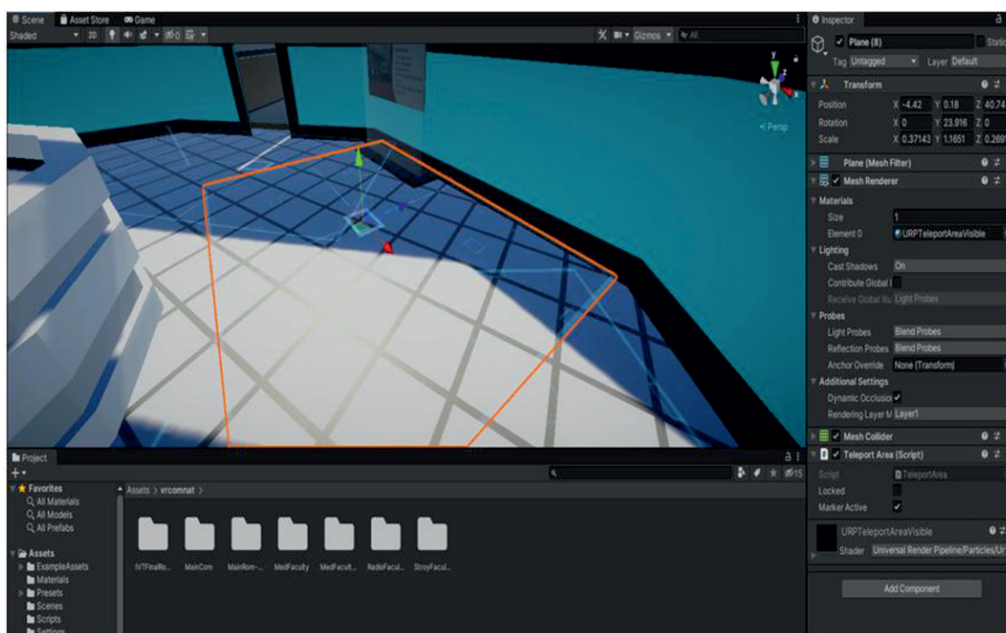


Рис. 5. Игровое пространство в Unity

На данный момент игровое приложение прошло успешное тестирование на базе HTC Vive Pro. Оценка эргономичности игры производилась по следующим основным критериям: 1) оформление (графика, звук), 2) геймплей (управление) и 3) сюжет (оптимальная длительность для конкретного случая). Параметрами оценки эргономичности в данном случае являются, в частности, частота кадров в секунду, оптимальное расположение элементов, наличие в игре системы подсказок и т.д. [8]. По критериям оформления данное приложение оценивается как эффективное по ряду показателей. Количество движущихся объектов в поле зрения в рамках нормы, на принятие решения игроку дается неограниченное время. При оценке по второму критерию (геймплею) можно выделить следующие основные пункты: имеется встроенная система подсказок в виде игрового персонажа, который визуальнo и в формате звука помогает игроку в продвижении уровней, кнопки управления интуитивно понятны для игроков, уже использовавших VR-шлем, так как физические кнопки джойстика отвечают за стандартные команды. В основе сюжета своеобразный квест, в процессе прохождения игрок получает ощущения в виде появляющейся на стендах информации и голосовых реплик персонажа-помощника. В силу специфики данного образовательного приложения игроку выделено неограниченное время на прохождение игры и возможность возврата ко всем локациям. Таким образом, можно сделать вывод о том, что сюжет игры и подача материала соответствуют эргономическим критериям.

### Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрены вопросы разработки игры виртуальной реальности (VR). Данная программа является игровой, она применяется для ознакомления с организацией, преимуществами и факультетами университета (ЧГУ им. И.Н. Ульянова) в игровой форме и совершенствования логического мышления.

Программный продукт разработан с использованием межплатформенной среды разработки Unity и включает авторские уникальные технологии. Собственная игровая механика с элементами виртуальной реальности (VR), уникальный сюжет, проработанный дизайн уровней. Разработанное приложение может быть расширено дополнительными игровыми мирами, возможна реализация для конкретных вузов. Результаты данной работы могут быть использованы для популяризации новейших информационных технологий и технического образования в целом.

### Список литературы

1. Сергеев Е.С., Алюнов Д.Ю. Развитие интернета вещей в мире и в Чувашской Республике // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сборник докладов и научных статей Всероссийской научно-практической конференции (посвящается 50-летию Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова). 2018. С. 498–504.
2. Алюнов Д.Ю., Мытникова Е.А., Мытников А.Н. Статистическая обработка данных с использованием пакетов языка R // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сборник докладов и научных статей Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 135–145.
3. Маслов А.С., Белов Ю.С. Рендеринг в технологиях дополненной реальности на мобильных платформах с использованием Vuforia // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 1. С. 16–20.
4. Романов Р.А., Сергеев Е.С. Разработка игрового автосимулятора с использованием Unity и 3ds Max // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сборник докладов и научных статей Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 161–168.
5. Приемная комиссия ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» – бакалавриат, специалитет [Электронный ресурс]. URL: <https://abiturient.chuvsu.ru/urovni/bakalavriat> (дата обращения: 25.03.2021).
6. Гараева Э.Р., Бикмуллина И.И., Барков И.А. Особенности подготовки 3D-объектов, смоделированных в Blender, для импорта в Unity 3D // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 4 (52). С. 66–74.
7. Костин М.А., Казиахмедов Т.Б. Исследование среды разработки Unity с использованием технологий виртуальной реальности // Современное программирование: материалы III Международной научно-практической конференции. Нижневартовск, 2021. С. 72–75.
8. Горячкин Б.С., Ковалев В.В. Эргономика в компьютерных играх // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 3. С. 31–35.

УДК 681.2.085

## ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ИНДИКАТОРА ЧАСОВОГО ТИПА

**Чернега Е.Ю., Семенов В.С., Будогянц А.Р.**

*Инструментальная мастерская CHERNEGA ROSE, Ростов-на-Дону,  
e-mail: hellper1992@gmail.com*

В статье рассматривается способ модернизации индикаторов часового типа (ИЧ), в частности типа ИЧ-2. Предлагается модернизация, состоящая в установке на ИЧ цифрового модуля, измеряющего его показания и передающего их беспроводным способом на устройства пользователя, а также проводным способом – по интерфейсу USB. Предпосылкой к проведению данного исследования является то, что сегодня индикаторы часового типа широко распространены на производстве, а существующие на рынке их цифровые беспроводные аналоги имеют высокую стоимость. Но, поскольку в функции беспроводной передачи данных состоит ключевое преимущество перед механическими предшественниками в плане эргономики и безопасности применения, рассматривается модернизация механических индикаторов. Решение в виде цифрового модуля позволяет модернизировать уже существующую инструментальную базу до уровня современных цифровых устройств при себестоимости на 1–2 порядка меньше. Проводится обзор способов преобразования параметров механического движения узлов ИЧ в цифровой сигнал, приводится их сравнение по таким параметрам, как разрешение, количество импульсов на оборот, габаритные размеры и др. Дается обоснование выбранного вида энкодера. Представляется концепция конструкции и структуры электронной части конечного решения с примерами реализации его основных узлов.

**Ключевые слова:** индикатор часового типа, цифровой модуль, магнитный энкодер, цифровая модернизация

## DIGITAL MODULE FOR DIAL GAUGE

**Chernega E.Yu., Semenov V.S., Budogyants A.R.**

*CHERNEGA ROSE tool shop, Rostov-on-Don, e-mail: hellper1992@gmail.com*

The article discusses a way to modernize dial gauge (ICh), in particular, ICh-2 type. Proposed upgrade consists in installing a digital module on the ICh to measure its readings and transmit them wirelessly to the user's devices, as well as by wired method – via USB interface. The prerequisite for this research is that today dial indicators are widespread in production, and their digital wireless counterparts existing on the market are of high cost. However, since the wireless data transmission function has a key advantage over mechanical predecessors in terms of ergonomics and safety of use, the modernization of mechanical indicators is being considered. The solution in the form of a digital module allows upgrading the existing tool base to the level of modern digital devices at a cost price that is 1-2 orders lower. Carried out a review of the methods of converting the parameters of the mechanical movement of the ICh units into a digital signal, their comparison is given in terms of such parameters as resolution, the number of pulses per revolution, overall dimensions, and others. Presented the concept of the mechanical and electrical parts of the final solution with examples of the implementation of its main units.

**Keywords:** dial gauge, digital module, magnetic encoder, digital upgrade

Точность изготовления деталей машин – жизненно важное условие их долговечности и надлежащего исполнения функций. Современное производство оперирует единицами и долями микронов при задании размеров деталей: для обеспечения нужных посадок, отсутствия нештатных зазоров и т.д. Наряду с современным оборудованием сегодня используются и механические инструменты, изобретенные за десятки лет до появления цифровых измерительных приборов. В данной статье рассматривается широко применяемый в машиностроении инструмент – индикатор часового типа (ИЧ) (рис. 1).

Этот простой прибор преобразует поступательное движение штока во вращательное движение стрелки, отображая смещение в сотых или тысячных долях миллиметра, в зависимости от конструкции индикатора [1]. Применяется ИЧ широко: в качестве центроискателя, для определения неравно-

мерности толщины покрытий, величины износа трущихся поверхностей, для измерения зазоров, амплитуды биения валов и многого другого. К его преимуществам следует отнести простоту и надежность конструкции, удобство использования в составе технологической оснастки, точность и повторяемость измерений. Недостатки, такие как дрожание стрелки или неравномерность ее перемещения ввиду проблем со смазкой механизма, в основном присущи самым простым и дешевым ИЧ. Но основным недостатком, представляющим проблему данной статьи, является необходимость визуального контакта со стрелочным прибором, используемым в процессе измерений. Это может быть затруднено, если требуется измерять параметры движущейся поверхности, к которой, по технике безопасности, нельзя приближаться, или заготовка расположена в обрабатывающем оборудовании так, что сложно увидеть циферблат ИЧ.



Рис. 1. Индикатор часового типа

Сотрудники производственного участка инструментальной мастерской Chernega Rose ежедневно сталкиваются с этой и другими проблемами производства, актуальными на любом предприятии машиностроения. Но в то время как большинство из них не решает описанные выше проблемы, не придавая должного значения их влиянию на качество выполняемых работ, руководством Chernega Rose была представлена к научному решению проблема использования ИЧ в качестве центроискателя, при которой часть станка или заготовки перекрывают циферблат ИЧ. Последствиями этой проблемы является повышение времени технологических операций и ухудшение качества измерений, что в конечном счете сказывается и на экономических показателях производства.

Данная проблема решается сегодня с помощью цифрового измерительного индикатора – прибора в том же форм-факторе, что и ИЧ, но отображающего показания на цифровом дисплее, с функцией беспроводной передачи данных. Именно беспроводная передача данных обеспечивает безопасность и эргономичность применения данного прибора. Показания можно наблюдать в приложении на смартфоне либо регистрировать в программе на рабочем ПК. Однако решение это является весьма дорогостоящим относительно простого механического ИЧ. Беспроводной цифровой

аналог может стоить в 10–80 раз дороже, что отражает экономический аспект проблематики данной статьи.

Принимая во внимание, что сегодня машиностроительное производство все еще повсеместно применяет ИЧ, а переход на высокоточные обрабатывающие центры многим предприятиям не под силу или вовсе нерентабелен, необходимо разработать решение, которое позволит получить цифровой беспроводной индикатор из обычного ИЧ посредством установки на него цифрового модуля. Целью данного исследования является разработка концепции цифрового модуля для ИЧ. Задачи, которые при этом необходимо решить, это определение технологии преобразования параметров движения механизмов ИЧ в цифровой сигнал, определение структуры цифрового модуля и общего вида его конструкции.

#### Исходные данные

Чтобы осуществить обоснованный выбор технологий, лежащих в основе работы цифрового модуля, зададим технические требования к цифровому модулю (табл. 1).

#### Способы преобразования параметров движения механизмов ИЧ в цифровой сигнал

Индикаторы часового типа содержат механизмы как поступательного, так и вращательного движений. Поступательные движения совершает шток ИЧ, вращательные – шестерни, выходной вал. Наиболее подходящим элементом конструкции, с которым будет связан разрабатываемый модуль, является выходной вал – для доступа к нему не требуется существенной разборки ИЧ. Рассмотрим в первую очередь способы преобразования параметров вращательного движения вала в электронный сигнал.

*Потенциометр.* Одним из самых простых и дешевых решений является поворотный переменный резистор, включаемый в электрическую цепь по схеме потенциометра [2, с. 32].

Таблица 1

#### Основные требования к цифровому модулю

Параметр	Значение
Точность	Согласно паспорту на ИЧ
Габариты	Не более 100% от размера ИЧ
Автономность работы	Не менее 3 ч без подзарядки внутреннего источника питания
Индикация, сбор данных	В приложении на смартфоне, в программе на ПК. Передача данных по Bluetooth, USB

Вал потенциометра сопрягается со-относно с выходным валом ИЧ с помощью какой-либо муфты. Вал при перемещениях штока ИЧ будет вращаться и передавать момент на вал переменного резистора. Сигнал на выходе потенциометра будет изменяться пропорционально перемещению штока ИЧ. Соответственно, для получения данных в цифровом виде модуль должен содержать аналого-цифровой преобразователь (АЦП), на вход которого будет поступать сигнал  $U_{вых}$  с потенциометра.

Преимущества данного подхода: дешевизна. Переменные резисторы общего применения широко доступны, имеют низкую стоимость.

Недостатки: большие габариты, низкая точность, низкие повторяемость и стабильность резистивных характеристик, однооборотность. В изделиях, требующих точных измерений, применяются прецизионные переменные резисторы, стоимость которых превышает стоимость уже готовых цифровых ИЧ. Кроме того, переменные резисторы общего применения являются однооборотными. Простота его конструкции обуславливает стоимость, но в случае с ИЧ требуется совершать два и более оборота. Размеры переменного резистора сравнимы с размером самого ИЧ, что также может создать неудобства в его использовании.

По совокупности рассмотренных аспектов применения потенциометра, можно сделать вывод: решение на основе потенциометра не подходит для создания цифрового модуля.

*Оптический энкодер.* Самым распространенным в практике машиностроения способом преобразования параметров вращательного движения в электрический сигнал является применение оптического энкодера [3], рис. 2.

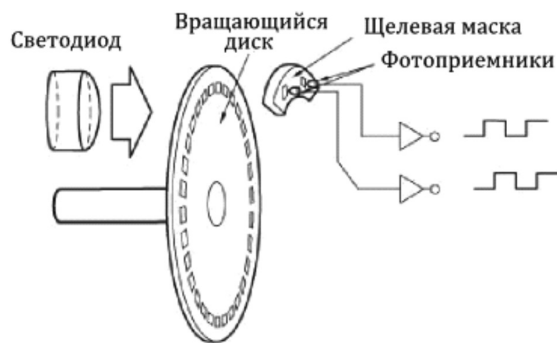


Рис. 2. Упрощенная схема оптического энкодера с квадратным выходом

Диск энкодера устанавливается на выходной вал ИЧ, а фотоприемники можно разместить на электронной плате или иным конструктивным образом. Электрические импульсы, получаемые на выходах фотоприемников, поступают на микроконтроллер для обработки, подсчета импульсов и определения направления вращения. Зная параметры диска, можно произвести расчет положения вала на основе текущего количества подсчитанных импульсов.

Преимущества данного подхода: высокое разрешение (количество импульсов на оборот от 1000 и более), высокая помехоустойчивость, надежность.

Недостатки: относительно высокая стоимость комплектов диск – фотодатчик с разрешением более 500 импульсов на оборот (наиболее дорогое решение из рассматриваемых, сравнимо со стоимостью существующих на рынке цифровых индикаторов), диск с фотодатчиком имеют габариты, сравнимые с размером ИЧ.

Поскольку идея цифрового модуля предполагает по возможности наиболее компактное и экономичное решение, применение оптического энкодера является нецелесообразным.

*Ёмкостный энкодер.* Существуют ёмкостные энкодеры [4] углового и линейного типов, изображенные на рис. 3 слева и справа соответственно.

Энкодер углового типа устанавливается на вращающийся вал, как и энкодеры предыдущих типов, а линейный датчик может быть установлен непосредственно на штоке ИЧ для измерения параметров его поступательного движения. Ёмкостные угловые энкодеры обычно используются в робототехнике, а именно в манипуляторах, где скорости перемещений невысоки, а диаметры валов составляют десятки миллиметров и более. Линейный датчик сегодня широко используется в цифровых штангенциркулях, а также в уже существующих в продаже цифровых индикаторах.

Преимущества ёмкостных энкодеров: наилучшая компактность среди рассматриваемых вариантов, простота конструктивного исполнения, высокая точность и разрешение.

Недостатки: подверженность электромагнитным помехам, потребность в прецизионной схеме обработки сигналов, сложность интеграции в исходную конструкцию ИЧ.

Ёмкостные энкодеры представляют особый интерес, несмотря на свои недостатки. Они позволяют достигать большой точности измерения, компактны и дешевы, а проблема помехозащиты имеет типовые решения.

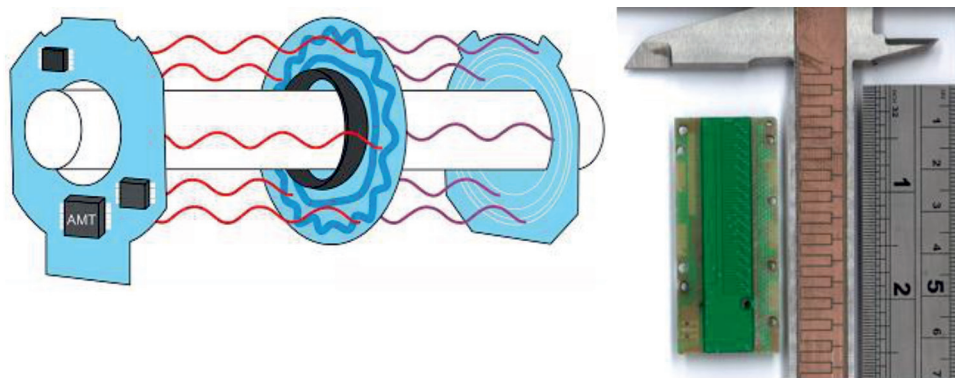


Рис. 3. Основные элементы углового энкодера (плата передатчика, плата с особым проводящим рисунком, плата приемника, вал) и линейного энкодера (подвижная и неподвижная части штангенциркуля)

Динамические характеристики (максимальная скорость поворота вала или движения рамки штангенциркуля, если приводить к движению измерительного механизма) в некоторых исполнениях емкостного энкодера несколько ограничивают применение данной технологии в ИЧ, но не исключают возможность ее применения.

В рамках задачи создания цифрового модуля для уже изготовленных механических ИЧ, ёмкостные энкодеры не подходят, однако их стоит рассматривать как основу для цифровых ИЧ собственного производства. Это является темой отдельной статьи и не входит в рамки данного анализа.

**Другие типы энкодеров.** К разряду «других» энкодеров отнесем механические и индуктивные энкодеры, которые имеют ряд существенных недостатков в контексте создания цифрового модуля для ИЧ. Ввиду данных недостатков (габариты, дрейбз контактов механического энкодера [5], низкая максимально допустимая частота вращения подвижной части [6]), исключим их из рассмотрения.

**Магнитный энкодер.** Альтернативой оптическому энкодеру является магнитный энкодер [7] на основе датчиков Холла. На рис. 4 показана упрощенная схема магнитного энкодера на дискретных элементах.

Сегодня магнитные энкодеры можно реализовать множеством исполнений. В случае определения параметров вращения вала подходящим вариантом будет применение высокоинтегральных микросхем-энкодеров, содержащих массив элементов Холла, цепи усиления, фильтрации и интерполяции, и цифровой интерфейс. Одним из типичных представителей такого рода микросхем является AS5040 производства AustriaMicroSystems.

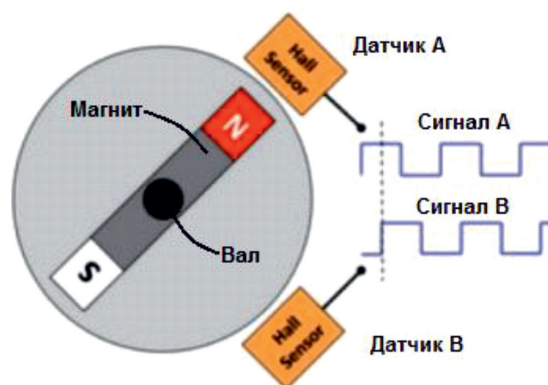


Рис. 4. Упрощенная схема магнитного энкодера с квадратурным выходом

Для применения данного вида энкодера на вал концентрично устанавливается цилиндрический диаметрально намагниченный магнит, а над ним располагается микросхема энкодера, причем ось вращения магнита должна проходить через геометрический центр корпуса микросхемы.

Преимущества данного подхода: хорошее разрешение (в среднем 512–1024 импульсов на оборот), динамические характеристики, помехоустойчивость, компактность, невысокая стоимость и легкодоступность элементов (магнит и микросхема).

Недостатки магнитного энкодера в применении к оцифровке параметров движения вала ИЧ на данный момент не очевидны. Исходя из представленных выше характеристик, отметим, что магнитный энкодер является наиболее подходящим решением в создании цифрового модуля для ИЧ.

Таблица 2

Характеристики энкодеров

Тип энкодера	Разрешение, импульсов на оборот	Габариты, % от габаритов ИЧ	Максимальная скорость вращения вала/ движения рамки	Стоимость решения относительно стоимости готового цифрового ИЧ, %
Потенциометр	1024...4096	40...60	не нормирована	4...100
Оптический	≥ 1000	25...60	12000 об/мин	70...90
Магнитный	512...2048	8...12	30000 об/мин	15...50
Ёмкостный	≥ 512	15...25	1,5 м/с	35...60

*Сравнительный анализ.* Теперь, когда рассмотрены все существующие типы энкодеров и рассмотрены аспекты их применения в создании цифрового ИЧ, сведем их характеристики в табл. 2.

Как видно из таблицы, наилучшими кандидатами для создания цифрового модуля для ИЧ являются магнитный и ёмкостный энкодеры. Стоимость решения на их основе не лишает смысла разработку цифрового модуля, а их габариты позволят сделать цифровой модуль небольшим и эргономичным.

Рассмотрев все варианты и приняв во внимание недостатки ёмкостного энкодера, можно делать обоснованный вывод о применении магнитного энкодера в качестве основы цифрового модуля для ИЧ.

*Концепция исполнения цифрового модуля на основе магнитного энкодера*

На основе требований, представленных в табл. 1, можно определить примерный состав цифрового модуля. Так, необходимо наличие интерфейса USB для возможности продолжительного измерения и/или передачи данных на ПК, а также модуль Bluetooth для реализации беспроводной передачи. В составе цифрового модуля также должен присутствовать основной элемент – магнитный энкодер, например AS5040, а также микроконтроллер, который будет управлять всеми функциями, считывать и отправлять данные.

Габаритные размеры ИЧ ограничивают емкость устанавливаемого аккумулятора, но, с учетом этого ограничения, добиться желаемого времени автономной работы не представляется сложным. Например, литий-полимерный аккумулятор размером 4x20x25 мм имеет емкость 150 мАч, что достаточно для работы в течение 4 ч при потреблении тока более 35 мА. Наличие аккумулятора, в свою очередь, предполагает наличие схемы управления питанием – для переключения между питанием от USB / от аккумулятора, и для обеспечения корректного заряда аккумулятора (в том числе во время работы цифрового модуля).

Потребление тока 35 мА является типовым для связки наиболее применяемого Bluetooth модуля HC-05/HC-06 и энергоэффективного микроконтроллера STM32 серии F1xxx. Также необходимо наличие кнопок управления и светодиодной индикации состояния модуля. Таким образом, электронная часть цифрового модуля должна иметь следующие узлы: аккумулятор, регулятор напряжения, зарядное устройство, энкодер, кнопки управления, светодиодная индикация, интерфейс USB, Bluetooth, микроконтроллер.

Для обеспечения возможности установки цифрового модуля необходимо демонтировать защитное стекло, стрелки, циферблат и кольцо установки нулевого положения стрелки. Корпус цифрового модуля будет монтироваться на три винта, проходящие сквозь плату, дистанцированную от ИЧ шестигранными стойками.

С учетом вышесказанного представим на рис. 5 конструкцию цифрового модуля и способ его монтажа на ИЧ.

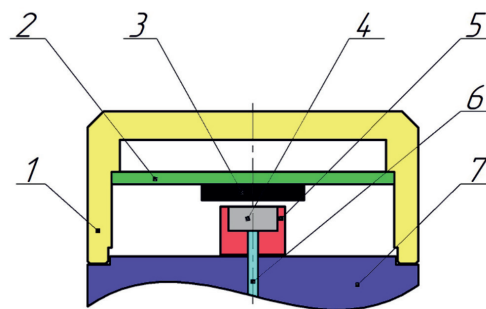


Рис. 5. Конструктивные элементы цифрового модуля, где 1 – корпус цифрового модуля, 2 – печатная плата, 3 – микросхема энкодера, 4 – магнит цилиндрической формы с диаметральным намагничиванием, 5 – переходная деталь для установки магнита на вал ИЧ, 6 – вал ИЧ, 7 – корпус ИЧ

Разработка электроники и ПО цифрового модуля будет производиться в бесплатных средах DipTrace и STM32CubeIDE соответ-

ственно. Оба пакета предоставляют все необходимые функции для разработки устройства, просты и удобны в использовании.

### Заключение

В данной статье была определена проблема модернизации инструментальной базы предприятий на примере индикаторов часового типа, предложено и обосновано решение в виде цифрового модуля на основе магнитного энкодера. Разработка цифрового модуля для ИЧ позволит сократить время операций с его использованием, повысить их безопасность и качество благодаря новым функциям – проводной / беспроводной передаче данных и возможности производить их сбор, хранение и обработку. Цифровой модуль позволит производить как повседневные операции, так и длительные автоматизированные лабораторные испытания. Также большой потенциал использования ИЧ лежит в области обработки деталей на станках с программным управлением – наличие цифрового интерфейса позволяет организовать обратную связь от датчика в управляющую программу – в случае необходимости измерения параметров поверхности как перед обработкой детали, так и в самом процессе, в качестве промежуточных операций.

Разработка цифрового модуля целесообразна и с экономической точки зрения. Себестоимость цифрового модуля ожидает-

ся на 1–2 порядка ниже стоимости рыночных цифровых беспроводных индикаторов, что позволит не переоборудовать целые цеха предприятий новыми дорогостоящими приборами, а наделять цифровыми функциями давно проверенные механические ИЧ различных конструкций.

### Список литературы

1. Никифорова Л.А. Измерение отклонений формы и поверхностей деталей машин индикатором часового типа: методические указания. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. 20 с.
2. Михайлов М.А., Манойлов В.В. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении системы автоматического регулирования сканеров СЗМ // Научное приборостроение. 2013. № 2. С. 27–37.
3. Фатеев А.В. Виды и принципы действия датчиков угла поворота // Технический портал SMARTEN.INFO. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://smarteht.info/post/datchiki-uglovogo-polozheniya-vidy-i-principy-deystviya.html> (дата обращения: 22.03.2021).
4. Глинов М.А. Введение в емкостные энкодеры // Конструкторское бюро роботизированных систем. 2016. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <http://kb-rs.ru/wp-content/uploads/2016/04/KBRS01-Vvedenie-v-emkostnye-encodery.pdf> (дата обращения: 22.03.2021).
5. Ширяев В.В. Измеряя параметры вращения: энкодеры Bourns // Компэл. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/67028> (дата обращения: 25.03.2021).
6. Голошапов А.П. Энкодеры и датчики Zettlex на основе новой технологии индуктивных измерений // Элементарная база электроники. 2015. № 2. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.electronics.ru/files/article\\_pdf/4/article\\_4527\\_161.pdf](https://www.electronics.ru/files/article_pdf/4/article_4527_161.pdf) (дата обращения: 25.03.2021).
7. Авдеев Б.А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики. СПб.: Научно-технические технологии, 2018. 261 с.



УДК 62:615.471

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ РАЗМОРАЖИВАНИЯ И ПОДОГРЕВА КРИОКОНСЕРВИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ КРОВИ

<sup>1</sup>Жданов А.Е., <sup>1</sup>Доросинский Л.Г., <sup>1</sup>Борисов В.И.,  
<sup>1</sup>Негодяев К.Е., <sup>2</sup>Евдоким Л.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,  
Екатеринбург, e-mail: zhdanov@ieee.org;

<sup>2</sup>Infineon Technologies Romania SCS, Бухарест, e-mail: lucy\_evd12@yahoo.com

Электронные средства измерений для размораживания и подогрева криоконсервированных продуктов крови представляют собой технические средства, используемые при измерениях электрических, магнитных и электромагнитных величин, характеризующих температурные характеристики объекта размораживания и подогрева. В русскоязычной литературе такие технические средства принято называть размораживателями. Размораживатели криоконсервированных продуктов крови должны реализовывать размораживание до целевой температуры +37 °С в условиях оптимально выбранного и фиксированного времени подогрева, обеспечивать и сохранять биологическую ценность субстанции, используемой для трансфузии. При достижении целевой температуры размораживаемой субстанции отклонение температуры от +37 °С не должно превышать ±0,5 °С. Однако существующие на сегодняшний день технические средства имеют точность поддержания температуры в процессе термостатирования ±1 °С. При разработке технических средств для быстрой высокоточной разморозки криоконсервированных продуктов крови необходимо определить параметры системы, такие как: тип продукта крови, теплоноситель, технология нагревания, габаритные размеры камеры размораживания, объемы размораживаемых пакетов с продуктами крови и т.д. Комбинаторный подход позволяет определить оптимальные параметры системы, однако на сегодняшний день не существует исследований моделирования размораживания криоконсервированных продуктов крови для трансфузионно-инфузионной терапии, учитывающих мультивариантность системы размораживания. Таким образом, при разработке технических средств быстрой высокоточной разморозки криоконсервированных продуктов крови для трансфузионно-инфузионной терапии фундаментальной является задача разработки программного решения для моделирования систем размораживания. Представленный в настоящей статье обзор и сравнительный анализ радиоизмерительных приборов для размораживания и подогрева плазмы, крови и инфузионных растворов реализован при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90037.

**Ключевые слова:** размораживание, размораживатели, термостатирование, размораживание криоконсервированных продуктов крови, продукты крови, служба крови, размораживатели

## OVERVIEW OF ELECTRONIC TEST EQUIPMENT FOR DEFROSTING AND HEATING OF CRYOPRESERVED BLOOD PRODUCTS

<sup>1</sup>Zhdanov A.E., <sup>1</sup>Dorosinskiy L.G., <sup>1</sup>Borisov V.I., <sup>1</sup>Negodyaev K.E., <sup>2</sup>Evdochim L.

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Engineering School of Information Technologies, Telecommunications  
and Control Systems, Yekaterinsburg, e-mail: zhdanov@ieee.org;

<sup>2</sup>Infineon Technologies Romania SCS, Bucharest, e-mail: lucy\_evd12@yahoo.com

Electronic test equipment for defrosting and heating cryopreserved blood products are technical means used to measure electrical, magnetic and electromagnetic quantities characterizing the temperature characteristics of the object to be defrosted and heated. In the science literature, such technical means are called defrosters. Defrosting apparatus for cryopreserved blood products must perform defrosting to a target temperature of +37 degrees Celsius under conditions of an optimally selected and fixed heating time, ensure and maintain the biological value of the substance used for transfusion. When the target temperature of the substance to be thawed is reached, the temperature deviation from +37 degrees Celsius should not exceed ± 0.5 degrees Celsius. However, the currently existing technical means have an accuracy of maintaining the temperature during the thermostating process of ± 1 degree Celsius. During developing technical means for rapid high-precision defrosting of cryopreserved blood products, it is necessary to determine the parameters of the system, such as type of blood product, heat carrier, heating technology, overall dimensions of the defrosting chamber, volumes of bags with blood products to be opened, and so on. The combinatorial approach allows one to determine the optimal parameters of the system, however, to date, there are no studies of modeling the thawing of cryopreserved blood products for transfusion-infusion therapy, taking into account the multivariate of the thawing system. Thus, in the development of technical means for rapid high-precision defrosting of cryopreserved blood products for transfusion-infusion therapy, the fundamental task is to develop a software solution for simulating defrosting systems. This article shows the review and comparative analysis of electronic test equipment for defrosting and heating plasma, blood and infusion solutions. The reported study was funded by RFBR, project number 20-37-90037.

**Keywords:** defrosting, defrosting equipment, thermostating, defrosting of cryopreserved blood products, blood products, transfusion-infusion therapy, blood service, thawing equipment

Существующая в настоящее время деятельность служб крови и трансфузиологии регламентируется Федеральным законом «О донорстве крови и ее компонентов» от 20.07.2012 № 125-ФЗ. Кроме того, она периодически актуализируется введением поправок или редакций. Настоящий Федеральный закон устанавливает правовые, экономические и социальные основы развития донорства крови и ее компонентов в Российской Федерации в целях организации заготовки, хранения, обеспечения ее безопасности и клинического использования [1], а также охраны здоровья доноров крови и ее компонентов, реципиентов и защиты их прав [2, 3].

В последнее время в трансфузиологии активно внедряются технологии быстрого замораживания, размораживания и подогрева компонентов крови. Несоблюдение правил размораживания плазмы перед переливанием сопряжено с инактивацией факторов свёртывания крови. Таким образом, современные устройства должны успешно и без повреждений размораживать криоконсервированные эритроциты, что регламентируется ГОСТ Р 52938-2008. Следует отметить, что переливание холодной эритроцитарной массы может вызвать [4] и усугубить гипотермию с различными патологическими проявлениями [5, 6]. Однако чрезмерное согревание их опасно из-за развития гемолитической иммунной реакции [7]. В [8] показано, что при превышении температуры разморозки в 37°C увеличивается свободный гемоглобин.

Согласно техническому регламенту о требованиях безопасности крови и ее продуктов, компоненты донорской крови необходимо размораживать до целевой температуры с помощью специального оборудования, что регламентируется ФЗ № 125-ФЗ от 20.07.2012. Размораживатели должны обеспечивать безопасное размораживание биологических объектов, а именно точный температурный контроль ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) и равномерный нагрев по всему объему пакета с кровью.

Наиболее распространенным инструментальным методом для размораживания биологических объектов сегодня является размораживание методом водяной бани. Так как размораживание происходит в жидкости, то температура крови внутри пакета оценивается относительно температуры теплоносителя, что в свою очередь не гарантирует точность показателя температуры внутри пакета.

Целью данного исследования является разработка технических средств для быстрой высокоточной разморозки криокон-

сервированных продуктов крови. Отметим, что на сегодняшний день слабо представлены исследования, посвященные моделированию размораживания криоконсервированных продуктов крови для трансфузионно-инфузионной терапии. Таким образом, при разработке технических средств быстрой высокоточной разморозки криоконсервированных продуктов крови фундаментальной является задача разработки программного решения для моделирования систем размораживания.

### Материалы и методы исследования

В трансфузиологической практике широко используются нижеперечисленные методы размораживания и подогрева продуктов крови и инфузионных растворов.

1. Метод размораживания в жидкости (водяная среда в виде теплоносителя), или контактный метод. Названный метод осуществляется на практике одним из следующих способов: принцип водяной бани, разморозка в турбулентных потоках жидкости, размораживание путём нагрева воды СВЧ излучением.

Принцип водяной бани.

В настоящее время применяется, как правило, ручной метод водяной бани. Этот метод обычно использует специализированные аппараты с автоматическим контролем температуры [9].

Разморозка в турбулентных потоках жидкости.

Способ размораживания препаратов крови, преимущественно плазмы крови, включает погружение пластиковых пакетов с замороженной до температуры от  $-25$  до  $-30^\circ\text{C}$  и ниже плазмой в ванну с водой до полного оттаивания при температуре воды не выше  $8^\circ\text{C}$  или от  $+35$  до  $+37^\circ\text{C}$  при турбулентном смывании мешков [10].

Размораживание по принципу нагрева воды СВЧ излучением и периодическим толканием контейнера крови.

В экранированной рабочей камере осуществляется нагрев воды СВЧ излучением [11], контроль осуществляется датчиками температуры. Для защиты биологического материала используют цилиндрическую емкость из диэлектрического материала с сетчатыми вставками.

2. Бесконтактный метод (полимерный контейнер с кровью не контактирует с водой). В этом случае конкретная реализация осуществляется с помощью следующих способов: сухой обогрев, разморозка с использованием изолированной воды как теплоносителя, размораживание СВЧ излучением.

Сухой обогрев.

Процесс размораживания и/или подогрева трансфузионных сред в пластико-

вых контейнерах форсированным воздушным потоком от подогревающей пластины по принципам принудительной конвекции и теплопроводности. Движение воздуха в направлении подогревающей пластины предотвращает образование конденсата на поверхности контейнера [12].

Разморозка с использованием изолированной воды как теплоносителя.

Между двумя подушками, наполненными водой, помещается до четырех пакетов с кровью или плазмой. Во время этого процесса вода закачивается в подушки, где она постоянно циркулирует. Этот процесс сухого отпуска гарантирует равномерное температурное распределение с умеренными флуктуациями водяного потока [13].

Размораживание СВЧ излучением.

Известно устройство для размораживания продуктов крови [14], в котором теплопередача осуществляется активным образом, путем воздействия на размораживаемый продукт микроволновой энергией. Устройство представляет собой металлический короб для размещения контейнера с размораживаемой кровью, имеющий дно, боковые стороны и металлическую крышку. Короб установлен на вращающемся поддоне внутри микроволновой печи. В крышке и дне короба выполнены отверстия для прохода микроволнового излучения. Вдоль отверстий установлены абсорбирующие излучение полоски и отражающие его на контейнер с кровью. Отверстия позволяют микроволновой энергии концентрироваться на большей части контейнера с кровью, в то время как края контейнера защищаются металлическим коробом [15].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Ни рисунке, а, представлено устройство для размораживания криоконсервированных продуктов крови «Плазмотерм-4» производства ООО «НПИ фирма «Гиперион» (Москва, Россия), предназначенное для размораживания продуктов крови. Данное устройство реализует размораживание плазмы в полимерных контейнерах (одновременное размораживание четырех контейнеров), а также размораживание эритроцитарной массы в полимерных или алюминиевых контейнерах (одновременное размораживание двух контейнеров).

Устройство может использоваться в отделениях трансфузиологии, переливания крови, гравитационной хирургии крови, отделениях хирургического и реанимационного профиля, операционных и в других подразделениях лечебно-профилактиче-

ских учреждений, где применяются компоненты и препараты донорской крови [16].

Устройство представляет собой термостатируемую ванну, в которой находится вода, подогретая до необходимой температуры. Контейнеры с продуктами крови размещаются в специальной корзине из нержавеющей стали, которая периодически встряхивается электродвигателем, при этом существенно снижается время размораживания [17].

Данный размораживатель сохраняет факторы крови за счет быстрого размораживания, что подтверждено клиническими испытаниями в Гематологическом научном центре, Военно-медицинской академии им. Кирова, Военно-клиническом госпитале им. Бурденко. На основании их рекомендаций была создана такая конструкция, которая позволяет гарантированно получить положительные результаты при размораживании плазмы. В таблице приведены основные параметры данного устройства [18, 19].

На рисунке, б, представлен аппарат для быстрого размораживания, подогрева и хранения в теплом виде плазмы, крови и инфузионных растворов «Лидмелт» (Leadmelt) производства компании ООО «Лидкор» (Екатеринбург, Россия).

«Лидмелт» предназначен для быстрого размораживания, подогрева и хранения в теплом виде плазмы, крови, компонентов крови и инфузионных растворов. Аппарат реализует равномерное распределение температуры по всему объему теплоносителя, обеспечивая безопасность процедуры, световая и звуковая система сигнализации своевременно информируют о возникновении аварийных ситуаций, аварийная система автоматически останавливает процесс разморозки при превышении температуры теплоносителя +38 °С. В таблице приведены основные параметры данного устройства.

На рисунке, в, представлен аппарат для размораживания и подогрева крови «SAHARA III» производителя TRANSMED Medizintechnik GmbH & Co. (Бад-Вюnnenберг, Германия).

Процесс обогрева, используемый в приборе сухого обогрева «SAHARA III», был разработан и протестирован в рамках научного проекта в Университете Падерборна (Германия). Система аппарата позволяет обогревать препараты крови, такие как цельная кровь, эритроцитарная масса или свежезамороженная плазма крови (СЗП), находящиеся на хранении в отдельных пластиковых гемоконтейнерах, до температуры тела. Сенсорный механизм, специально адаптированный для данного использования, и контрольный прибор, имеющий

в своей основе два микропроцессора, способны определять температуру любого препарата для переливания. Значимые параметры процесса обогрева: продолжительность и конечная температура – устанавливаются автоматически для каждого типа препарата крови, что, соответственно, исключает затраты времени персонала на предварительную установку этих параметров. Благодаря исключению вероятности перегрева и унифицированному высокому качеству прогретого препарата крови этот стандартизированный процесс размораживания и подогрева гарантирует максимальную безопасность [20]. Тепло передается

от подогревающей пластины к препаратам крови, подлежащим переливанию в соответствии с принципом теплопроводности и от высокотурбулентного, нагретого окружающего воздуха в соответствии с принципом принудительной конвекции [21, 22]. В течение этого процесса устанавливаются температурные градиенты подогревающей пластины и окружающего воздуха, которые контролируются во избежание нагрева поверхностей, контактирующих с трансфузионным материалом, выше максимальной контактной температуры +37 °С [23]. В таблице приведены основные параметры данного устройства.



а)



б)



в)



г)

*Размораживатели криоконсервированных продуктов крови: а) «Плазмотерм-4» (ООО «НПИ фирма «Гиперион», Москва, Россия); б) «Лидмелт» (Leadmelt) (ООО «Лидкор», Екатеринбург, Россия); в) SAHARA III (TRANSMED Medizintechnik GmbH & Co., Бад-Вюnnenберг, Германия); г) Barkey Plasmatherm (Barkey GmbH & Co. KG, Леопольдсхёэ, Германия)*

Сравнительная таблица радиоэлектронных средств для размораживания криоконсервированных продуктов крови

Модель (производитель)	«Плазматерм-4» (ООО «НПИ фирма «Гиперион», Москва, Россия)	«Лидмелт» (Leadmelt) (ООО «Лидкор», Екатеринбург, Россия)	SAHARA III (TRANSMED Medizintechnik GmbH & Co., Бад-Вюnnenберг, Германия)	Barkey Plasmatherm (Barkey GmbH & Co. KG, Леопольдсхёэ, Германия)
Вместимость	от 1 до 4 контейнеров	от 1 до 4 контейнеров объемом до 500 мл	от 3 контейнеров	от 1 до 4 контейнеров по 500 мл или 2 контейнера по 800 мл
Теплоноситель	Вода	Недистиллированная вода	Нагретый воздух	Пластиковый контейнер с водой
Потребляемая мощность	не более 2600 Вт	не более 1500 Вт	не более 530 Вт	< 0,25 Вт в режиме ожидания 35 Вт в неактивном состоянии 55 Вт при непрерывной работе 37°C 1600 Вт – максимум
Заданная температура	от +37 до +45°C	от +37 до +45°C	от +37 до +45°C	от +37 до +45°C
Контроль температуры	Микропроцессорный	Микропроцессорный	Микропроцессорный	Микропроцессорный
Тип работы	Непрерывный	Непрерывный	Программный	Программный
Особенности	Возвратно-поступательное движение механизма перемешивания	Модули для фиксации стеклянных флаконов позволяют использовать аппарат для подогревания и помешивания инфузионных растворов	Прибор исключает образование конденсата на контейнере с кровью	Принудительное опосредованное перемешивание за счет волнообразного движения пластиковых подушек с теплоносителем

### Заключение

Рассмотренные в настоящей статье устройства являются наиболее популярными на рынке РФ. По описаниям производителей аппаратуры для трансфузиологической практики размораживания компонентов крови в аппаратах, построенных по принципу водяной бани не превышает по времени 20–25 мин. Информация о времени размораживания бесконтактными аппаратами не найдена. Можно отметить явные достоинства бесконтактного метода: отсутствие контакта с водой полимерных контейнеров. Устройство размораживания Plasmatherm не имеет аналогов во всем мире. В частности, ввиду отсутствия прямого контакта с жидким теплоносителем возможно размораживание продуктов крови при более высокой температуре. Соответственно, можно сократить время оттаивания до 10 мин. Недостатком Plasmatherm является наличие закрытой водной системы, объединенной с водонагревательными элементами. После определенного количества циклов оттаивания требуется замена

охлаждающей жидкости замкнутой системы и соответствующее обслуживание.

В рамках научного проекта № 20-37-90037 авторами настоящей статьи ведется исследование, посвященное разработке высокоточного метода размораживания криоконсервированных продуктов крови. В рамках взаимодействия с компанией-производителем трансфузиологического оборудования ООО «Лидкор» был опубликован ряд исследований [24, 25], направленных на модернизацию и разработку нового оборудования для трансфузионной терапии на базе текущей продукции компании [26].

Следует отметить, что в текущей ситуации пандемии коронавирусной инфекции 2019-nCoV тема размораживания криоконсервированных продуктов крови является как нельзя более актуальной, так как инфузия плазмы пациентов (с антителами), выздоровевших от 2019-nCoV, к пациентам больным этим заболеванием – это эффективный и проверенный временем метод. Данный метод был успешно использован во время вспышки эпидемии кори в 1930-х гг. и Эболы в 2014 г. Вопрос использования

плазмы с антителами выздоровевших пациентов в настоящее время привлекает внимание многих исследователей. Во многих странах этот метод лечения 2019-nCoV все еще тестируется, так как производство плазмы крови – очень долгий и трудоемкий процесс, требующий соблюдения высоких требований к заморозке, разморозке [27, 28] и хранению плазмы [29, 30].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90037.*

### Список литературы

1. Андреева Я.С., Майорова О.А., Буланов А.Ю., Мотюк К.С., Зинкин В.Ю., Белякова В.В., Ватагина Е.А. Острая гемолитическая реакция после трансфузии эритроцитсодержащих компонентов крови: причины, профилактика, клинические случаи // Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». 2020. Т. 9. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jnmp.ru/jour/article/view/1020> (дата обращения: 31.03.2021). DOI: 10.23934/2223-9022-2020-9-4-646-652.
2. Weiskopf R.B., Cook R.J. Known and Unknown Unknowns in Making Erythrocyte Transfusion Decisions. *Anesthesiology*. 2021. Vol. 134. No. 3. P. 359–362.
3. Kishenko V.V., Kondratov K.A., Mikhailovskiy V.Y., Sidorkevich S.V., Vavilova T.V., Sirotkina O.V., Fedorov A.V. The Release of Membrane Vesicles with Mature MicroRNA-221 and Activated Caspase-3 by Platelets during Storage of Platelet Concentrate. *Cell and Tissue Biology*. 2018. Vol. 12. No. 6. P. 506–509.
4. Чанчиев З.М., Четкин А.В., Романчишен А.Ф., Пастухова Н.К. Влияние температуры подогревания на степень гемолиза донорской эритроцитной массы // Трансфузиология. 2019. Т. 21. № 2. С. 48–54.
5. Kamenskaya O.V., Klinkova A.S., Chernyavskiy A.M., Lomivorotov V.V., Meshkov I.O., Karaskov A.M. Deep hypothermic circulatory arrest vs. antegrade cerebral perfusion in cerebral protection during the surgical treatment of chronic dissection of the ascending and arch aorta. *The journal of extracorporeal technology*. 2017. Vol. 49. No. 1. P. 16.
6. Андреева Я.С., Майорова О.А., Буланов А.Ю., Мотюк К.С., Зинкин В.Ю., Белякова В.В., Ватагина Е.А. Острая гемолитическая реакция после трансфузии эритроцитсодержащих компонентов крови: причины, профилактика, клинические случаи // Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». 2020. Т. 9. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jnmp.ru/jour/article/view/1020> (дата обращения: 31.03.2021). DOI: 10.23934/2223-9022-2020-9-4-646-652.
7. Задворнов А.А., Голомидов А.В., Григорьев Е.В. Опыт применения низкотехнологичной гипотермии у новорожденного с тяжелым гипоксически-ишемическим повреждением мозга // Вестник анестезиологии и реаниматологии. 2016. Т. 13. № 1. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.vair-journal.com/jour/article/view/81?locale=ru\\_RU](https://www.vair-journal.com/jour/article/view/81?locale=ru_RU) (дата обращения: 01.04.2021). DOI: 10.21292/2078-5658-2016-13-1-64-67.
8. Жибурт Е.Б., Шестаков Е.А., Кузнецов С.И. Гемолитические трансфузионные реакции // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. 2019. Т. 14. № 4. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.pirogov-vestnik.ru/upload/iblock/4dc/2019\\_4\\_20.pdf](https://www.pirogov-vestnik.ru/upload/iblock/4dc/2019_4_20.pdf) (дата обращения: 01.04.2021). DOI: 10.25881/BPNMSC.2020.17.22.020.
9. Bialas C., Moser C., Sims C.A. Artificial oxygen carriers and red blood cell substitutes: A historic overview and recent developments toward military and clinical relevance. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. 2019. Vol. 87. No. 1S. P. S48–S58.
10. Katoh H., Yokota K., Fehlings M.G. Regeneration of spinal cord connectivity through stem cell transplantation and biomaterial scaffolds. *Frontiers in cellular neuroscience*. 2019. Vol. 13. P. 248.
11. Turner M.A., Rahilly L.J., Kathryn O'Marra S. Ex vivo evaluation of the efficacy of canine fresh frozen plasma thawed using a microwave plasma defroster. *Journal of Veterinary Emergency and Critical Care*. 2018. Vol. 28. No. 6. P. 603–607.
12. Weiniger C.F., Yakirevich-Amir N., Sela H.Y., Gural A., Ioscovich A., Einav S. Retrospective study to investigate fresh frozen plasma and packed cell ratios when administered for women with postpartum hemorrhage, before and after introduction of a massive transfusion protocol. *International Journal of Obstetric Anesthesia*. 2018. Vol. 36. P. 34–41.
13. Ghosh I., Haldar R. Blood warming in trauma related transfusions-Precepts and practices. *Journal of Cardiovascular Medicine and Cardiology*. 2019. Vol. 6. No. 4. P. 094–097.
14. de Oliveira A.R., Da Silva I.D., Turco E.G., Júnior H.A., Maria de Lourdes L. Initial analysis of lipid metabolomic profile reveals differential expression features in myeloid malignancies. *Journal of Cancer Therapy*. 2015. Vol. 6. No. 15. P. 1262.
15. Lavers C.R., Fisk J.D., Lavers B.J.T. Environmental temperature and material Characterization of planar evanescent microwave sensors for environmental analysis. *SPIE Future Sensing Technologies*. International Society for Optics and Photonics. 2020. Vol. 11525. P. 115252T.
16. Fang B., Nakagawa K. Modification of casein aggregate microstructures under frozen conditions: A study using tunable resistive pulse sensing. *Food Hydrocolloids*. 2020. Vol. 98. P. 105259.
17. Bobrikhin A., Gudkov A., Leushin V., Lemondzhava V., Petrov V., Schukin S. Equipment for Thermal Treatment and Storage of Blood Preparations and Components. *Biomedical Engineering*. 2015. Vol. 49. No. 2. P. 116–119.
18. Baboo J., Kilbride P., Delahaye M., Milne S., Fonseca F., Blanco M., Meneghel J., Nancekivell A., Gaddum N., Morris G.J. The Impact of Varying Cooling and Thawing Rates on the Quality of Cryopreserved Human Peripheral Blood T Cells. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. No. 3417.
19. Гудков А.Г., Бобрин А.Ф., Леушин В.Ю., Маржановский И.Н., Горлачева Е.Н., Лемонджав В.Н., Шашурин В.Д. Устройство для хранения тромбоцитов крови // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. Т. 11. № 680. [Электронный ресурс]. URL: <http://izvuz-mash.ru/catalog/calcmach/hidden/1356.html> (дата обращения: 01.04.2021). DOI: 10.18698/0536-1044-2016-11-14-25.
20. Suthar M., Gupta S., Bukhari S., Ponemone V. Treatment of chronic non-healing ulcers using autologous platelet rich plasma: a case series. *Journal of biomedical science*. 2017. Vol. 24. No. 1. P. 1–10.
21. Heger A., Pock K., Römisch J. Thawing of pooled, solvent/detergent-treated plasma octaplasLG®: validation studies using different thawing devices. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*. 2017. Vol. 44. No. 2. P. 94–98.
22. Norda R., Schött U., Berséus O., Åkerblom O., Nilsson B., Ekdahl K.N., Stegmayr B.G., Knutson E.F. Complement activation products in liquid stored plasma and C3a kinetics after transfusion of autologous plasma. *Vox sanguinis*. 2012. Vol. 102. No. 2. P. 125–133.
23. Apelseh T.O., Kvalheim V.L., Kristoffersen E.K. Detection of specific immunoglobulin E antibodies toward common airborne allergens, peanut, wheat, and latex in solvent / detergent-treated pooled plasma. *Transfusion*. 2016. Vol. 56. No. 5. P. 1185–1191.
24. Кирьянова Г.Ю., Волкова С.Д., Гришина Г.В., Касьянов А.Д., Голованова И.С., Четкин А.В. Пролонгированное хранение при 4°C размороженных красных клеток крови в криозащитном растворе до отмыывания // Трансфузиология. 2017. Т. 18. № 4. С. 18–29.
25. Negodyaev K.E., Zhdanov A.E., Borisov V.I., Dorosinsky L.G. Overview of Blood Mixers for Transfusion Therapy: Characteristics, Features, and Development Potential // 2020 Ural

Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (Екатеринбург, 14–15 мая 2020 г.). Екатеринбург: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. С. 109–112.

26. Evdochim L., Zhdanov A.E., Borisov V.I., Dobrescu D. Reflection Coefficient in Pressure Pulse of Human Blood Flow // 2020 13th International Conference on Communications (COMM) (Бухарест, 18–20 июня 2020 г.). Бухарест: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. С. 65–68.

27. Evdochim L., Zhdanov A.E., Borisov V.I., Dobrescu D., Dorosinsky L.G. Blood Mixers for Transfusion Therapy: Photoplethysmogram application for blood velocity determination // 2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (Бари, 1 июня 2020 г. – 1 июля 2020 г.). Бари: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. С. 1–6.

28. Caballero L., McMillan M., Leavitt A. Thawing cryo-preserved apheresis products: comparison of barkey plasma-therm dry heating device and 37°C water bath. *Cytotherapy*. 2020. Vol. 22. No. 5. P. S140-1.

29. Barry N., Velickovic Z., Rasko J. Endotoxin quality control testing for CAR T-cell manufacturing: validation considerations for Endosafe portable testing system. *Cytotherapy*. 2020. Vol. 22. No. 5. P. S140.

30. Bornes F., Scibek J., Raczkowski R. Corning's cell culture monitoring system enables data-driven decisions for large-scale cell applications by providing remote, real-time monitoring of cell confluence in multi-layered cell culture vessels. *Cytotherapy*. 2020. Vol. 22. No. 5. P. S140.

31. Gutensohn K., Odendahl M., Kersten J.F., Tonn T. Validation of cord blood split products prepared by an automated method. *Transfusion Medicine*. 2013. Vol. 23. No. 1. P. 48–54.

УДК 004.43:621.396.677

## ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА PYTHON

Гридчин Н.В., Ильичев В.Ю.

*Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Для получения необходимой диаграммы направленности используют антенны в виде нескольких (часто большого количества) одинаковых симметричных вибраторов, объединённых в так называемые антенные решётки. Такие конструкции отличаются простотой изготовления и позволяют осуществлять острую направленность излучаемого электромагнитного сигнала. Однако для этого антенну необходимо правильно спроектировать, то есть практически осуществить определённые зависимости между размерными параметрами решётки, частотой и фазой сигнала, излучаемого каждым вибратором. Целью данной работы является разработка программного продукта, позволяющего исследовать указанные зависимости путём визуализации зависимости формы диаграммы направленности решётки от исходных данных. По результатам многовариантных расчётов необходимо выработать рекомендации, позволяющие получить нужную диаграмму направленности и добиться наибольшей эффективности работы антенны. Для создания расчётной программы был использован современный свободно распространяемый язык программирования Python и подключаемые к нему программные модули, расширяющие возможности языка с помощью наборов специальных функций. В частности, для разрабатываемой программы использованы: модуль для работы с массивами данных Numpy и модуль для построения графиков Matplotlib. На выходе программы в результате расчёта формируется диаграмма направленности антенной решётки в полярной системе координат, по которой исследователь может убедиться, имеет ли она необходимую форму и угол раскрытия. С помощью программы было исследовано достаточное количество антенн с разными параметрами для того, чтобы выработать рекомендации для получения оптимальной диаграммы направленности. Также даны и другие рекомендации, которые следует соблюдать при проектировании антенных решёток. Разработанная программа также может являться базой для исследования антенных решёток с динамическим изменением фазовых углов и антенн, работающих одновременно на разных частотах.

**Ключевые слова:** симметричный вибратор, антенная решётка, диаграмма направленности, язык Python, модуль Numpy, модуль Matplotlib

## CONSTRUCTION AND STUDY OF DIRECTIONAL DIAGRAMS OF ANTENNA ARRAYS BY MEANS OF PYTHON LANGUAGE

Gridchin N.V., Ilichev V.Yu.

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

To obtain necessary beam pattern, antennas are used in form of several identical symmetrical vibrators combined into antenna arrays. Such designs are easy to manufacture and allow for sharp directionality of emitted electromagnetic signal. However, it is necessary to design antenna to make certain dependencies between dimensional parameters of lattice, frequency and phase of signal emitted by each vibrator. Purpose of work is to develop software product that allows to investigate these dependencies by visualizing dependence of shape of grating pattern on original data. Based on results of multivariable calculations, it is necessary to develop recommendations to obtain directional pattern and achieve greatest efficiency of antenna. To create calculation program, modern freely distributed Python programming language and program modules were used, expanding capabilities of the language using sets of special functions. In particular, for the developed program, following are used: module for working with data arrays Numpy and module for plotting Matplotlib. At output of the program, as result of calculations, directional pattern of antenna array is formed in polar coordinate system, according to which researcher can verify whether it has necessary shape and opening angle. With the program, sufficient number of antennas with different parameters were investigated in order to make recommendations for obtaining optimal beam pattern. Other recommendations are also given that should be followed when designing antenna arrays. The program can also be basis for studying antenna arrays with dynamic change in phase angles and antennas operating simultaneously at different frequencies.

**Keywords:** symmetrical vibrator, antenna array, beam pattern, Python language, Numpy module, Matplotlib module

Одной из самых простых направленных антенн является одиночный симметричный вибратор. Однако его направленность крайне низка и чаще всего не соответствует потребностям современной техники. Поэтому для повышения направленности применяют систему из нескольких излучающих элементов – симметричных вибраторов, называемую антенной решёткой.

В настоящее время такие антенные решётки широко используются в навига-

ционных, радиолокационных и беспроводных системах связи [1]. В зоне, достаточно удалённой от решётки, напряженность электромагнитного поля равна сумме электромагнитных полей, создаваемых каждым излучателем антенного полотна, с учётом их фазы. При изменении амплитуды и фазы электромагнитных полей, излучаемых каждым вибратором решётки, появляется возможность создания необходимой диаграммы направленности [2]. При проекти-



ровании антенной решётки для этого можно варьировать, например, количество излучателей, их размеры, расстояние между ними.

В современных конструкциях некоторые из параметров решётки и излучаемых волн можно изменять динамически в процессе эксплуатации антенны, тем самым меняя вид диаграммы направленности (такие антенные решётки называют фазированными – ФАР). За счёт этого главный лепесток диаграммы направленности можно даже перемещать в пространстве (такой процесс называется электрическим сканированием луча и не требует механического перемещения всей антенны).

В данной работе рассматривается антенная решётка с эквидистантным (на одинаковом расстоянии друг от друга  $d$ ) расположением излучателей (рис. 1), размещённая в системе координат  $X, Y, Z$ .

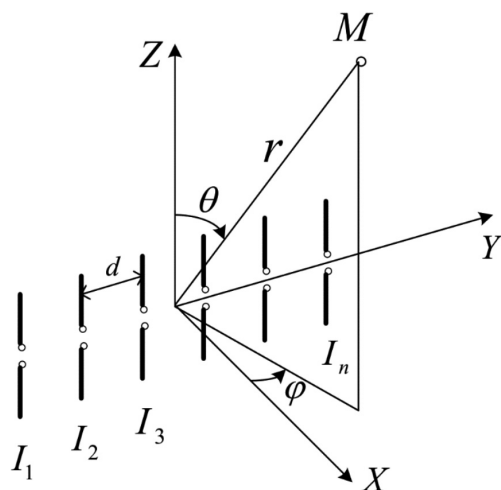


Рис. 1. Расчётная схема антенной решётки

При этом принято, что фаза тока в каждом последующем вибраторе увеличивается на некоторую задаваемую величину  $\psi$ , рад. Амплитуды токов во всех вибраторах приняты одинаковыми  $I_1 = I_2 = \dots = I_n$ .

Целью данной работы являлась разработка метода вычисления и построения диаграмм направленности в полярной системе координат в горизонтальной плоскости  $H$ , с использованием библиотек языка программирования Python. Разрабатываемый метод должен быть простым и удобным в использовании.

Для исследования изменения формы и углов расположения главных (имеющих наибольшую интенсивность электромагнитного излучения) и боковых лучей диаграммы направленности необходимо выполнить варианты расчёты при разных

исходных данных. По результатам исследований должны быть сформулированы рекомендации по выбору исходных данных с целью получения необходимой формы и направления диаграммы направленности.

При этом не ставится задача рассмотрения вариантов обеспечения нужного значения фазы  $\psi$ , для чего уже разработано множество способов, использующих различные технические приёмы [3, 4].

### Материалы и методы исследования

Согласно методике, изложенной в [5], в горизонтальной плоскости нормированная суммарная амплитуда  $F$  в заданной углами  $\varphi$  и  $\theta$  точке  $M$  (рис. 1) может быть рассчитана по формуле

$$F(\varphi) = \left| \frac{1}{n \left[ \sin \left[ \frac{n(kd \sin \varphi - \psi)}{2} \right] \right]} \right| \cdot \left| \frac{\sin \left[ \frac{kd \sin \varphi - \psi}{2} \right]}{\sin \left[ \frac{kd \sin \varphi - \psi}{2} \right]} \right|,$$

где  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$  – длина излучаемой волны,  $m$  ( $f$  – частота волны, Гц);  $k = 2\pi / \lambda$  – коэффициент фазы электромагнитной волны в свободном пространстве;  $n$  – число вибраторов.

Величина  $(kd - \sin \psi)$  характеризует сдвиг фаз между полями двух соседних вибраторов в точке  $M$ . Если в полярной системе координат рассматривать направление  $= 90^\circ$  (что соответствует оси координат  $Y$  в декартовой системе), то максимальное значение  $F$  получится при  $kd = \psi$ , так как  $\sin 90^\circ = 1$  и сдвиг фаз от всех вибраторов в точке  $M$  будет равен нулю, то есть в точку наблюдения  $M$  волны приходят синфазно, возникает их интерференция, и они складываются по амплитуде [6].

Алгоритм разработанной на основе указанных принципов программы состоит из следующих блоков:

1. Импорт необходимых модулей языка программирования Python: Numpy для создания массивов и заполнения их данными, необходимыми для визуализации результатов расчёта [7]; Matplotlib.pyplot для создания полярных диаграмм направленности [8].

2. Задание исходных данных: расстояния между вибраторами  $d$ , числа вибраторов  $n$  и значения фазового сдвига  $\psi$ .

3. Расчёт характеристик диаграммы направленности для заданной частоты  $f$ , Гц в порядке, описанном в [5].

4. Расчёт диаграммы направленности (функции  $F(\varphi)$ ) антенной решётки в предположении, что электромагнитные поля отдельных вибраторов являются синфазными.

При данном расчёте принят очень небольшой шаг изменения угла  $\varphi$  в горизонтальной плоскости (для плавности получаемых графиков); диапазон угла  $\varphi$  изменяется от 0 до  $2\pi$  рад.

Рассчитанные значения нормированной суммарной амплитуды тока  $F$  при разных углах  $\varphi$  (радиусы на плоскостной диаграмме направленности в полярных системах координат), так же как и соответствующие им углы  $\varphi$ , заносятся в массив Numpy.

5. С помощью функций модуля Matplotlib.pyplot изображаются диаграммы направленности антенны в полярных координатах (значение функции  $F$  в зависимости от угла  $\varphi$ ) в горизонтальной плоскости  $H$  (в которой мы обеспечиваем необходимые направленные свойства антенны).

### Результаты исследования и их обсуждение

Для демонстрации результатов работы разработанной программы в качестве примера была рассчитана антенная решётка конструкции, изображённой на рис. 1, работающая с частотой излучаемой волны  $f = 3 \cdot 10^9$  Гц (длина волны  $\lambda = 10$  см, диапазон СВЧ [9]), с расстоянием между вибраторами  $d = 0,25\lambda$ .

Вначале было принято условие  $kd = \psi$  для выполнения условия синфазного сложения волн (получаем так называемую синфазную антенную решётку).

Для исследования влияния количества симметричных вибраторов  $n$  на форму диаграммы направленности антенной решётки, число  $n$  варьировалось от 1 до 100.

Графики полученных с помощью программы диаграмм направленности электромагнитного излучения в горизонтальной плоскости  $H$  (плоскости  $X-Y$  декартовой системы координат) изображены на рис. 2.

Из представленных диаграмм можно сделать вывод, что для синфазной антенной решётки направление главного лепестка диаграммы всегда равно  $90^\circ$  (строго в направлении оси  $Y$ ), что является одним из достоинств рассматриваемого типа антенн. Ширина главного лепестка уменьшается с увеличением числа симметричных вибраторов  $n$ . Ширина боковых лепестков является небольшой и уменьшается при увеличении  $n$ . Кроме того, с увеличением  $n$  боковые лепестки по направлению всё более приближаются к главному лепестку. Таким образом, увеличивая число  $n$ , можно добиться очень малого угла раскрытия диаграммы.

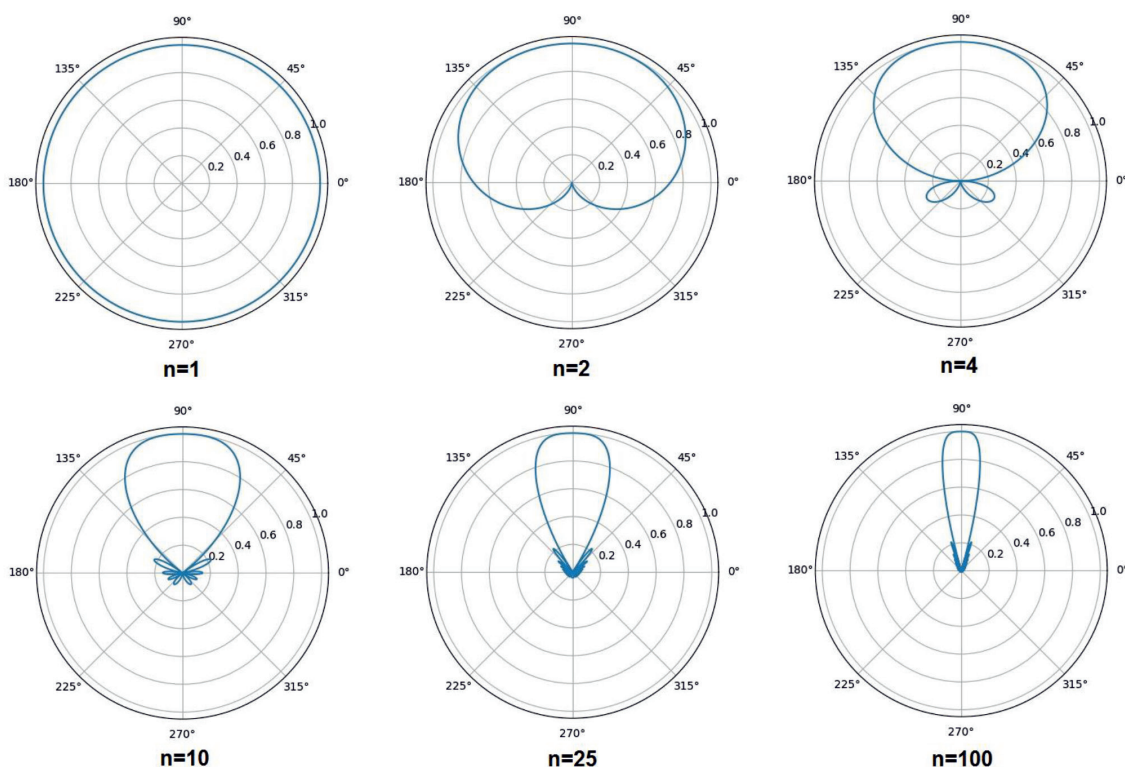


Рис. 2. Диаграммы направленности рассчитанных антенных решёток в горизонтальной плоскости  $H$  в зависимости от количества симметричных вибраторов  $n$

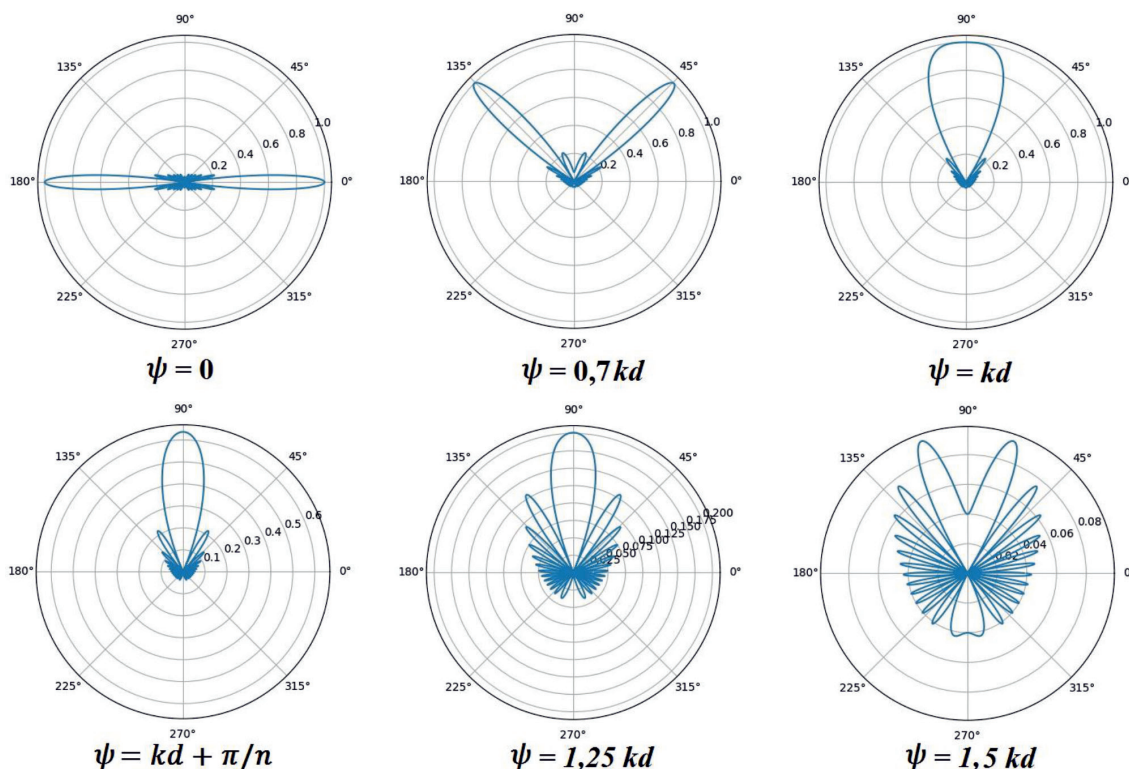


Рис. 3. Диаграммы направленности рассчитанных антенных решёток в горизонтальной плоскости  $H$  в зависимости от взаимного фазирования симметричных вибраторов  $\psi$

Далее был выбран промежуточный случай диаграммы с хорошей направленностью при  $n = 25$  и изменялось отклонение фаз вибраторов друг от друга  $\psi$  от нуля до величины  $kd$  (как на рис. 2) и больше. Результаты расчёта и построения диаграмм направленности с помощью разработанной программы показаны на рис. 3.

При относительной фазе  $\psi = 0$  антенна вообще не проявляет направленных свойств по оси  $Y$ . С постепенным увеличением фазы до значения  $\psi = kd$  главные лепестки фазы вначале сближаются, а затем сливаются. При фазовом угле  $\psi$ , равном  $kd$ , наблюдается не только строгая направленность главного лепестка по оси  $Y$ , но и максимальная амплитуда сигнала в данном направлении. При дальнейшем увеличении фазового угла до значения ( $\psi = kd + \pi/n$ ) направленность продолжает увеличиваться, однако из-за возрастания амплитуды боковых лепестков амплитуда главного лепестка уменьшается. Если и дальше увеличивать угол  $\psi$ , величина боковых лепестков всё увеличивается, а направленные свойства антенной решётки начинают ухудшаться. При ( $\psi > kd + \pi/n$ ) главный лепесток диаграммы начинает раздваиваться, и направленность ухудшается всё более значительно.

Расчёты, подобные вышеприведённому, проводились и для других частот электромагнитных волн, излучаемых антенной, – диаграммы направленности при этом имеют похожую форму.

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать выводы и выработать рекомендации по проектированию антенных решёток, не нуждающихся в динамическом изменении диаграммы направленности:

1) наилучшей разницей фаз волн, излучаемых отдельными вибраторами решётки, с точки зрения наибольшей амплитуды сигнала в направлении оси  $Y$ , следует считать  $\psi = kd$ ;

2) хотя направленные свойства антенны несколько повышаются при увеличении фазового угла до значения ( $\psi = kd + \pi/n$ ), это ведёт к уменьшению амплитуды сигнала. Поэтому рекомендуется улучшать направленность антенны при сохранении  $\psi = kd$  путём увеличения числа вибраторов – таким способом можно достичь очень узкого угла раскрытия диаграммы направленности;

3) не рекомендуется чрезмерно увеличивать направленность антенны, так как увеличение числа вибраторов приводит

к увеличению габаритов, массы и стоимости антенны. Поэтому при проектировании необходимо обязательно производить технико-экономическое обоснование, при котором можно использовать разработанную программу;

4) при технико-экономическом обосновании следует выбирать материал для изготовления антенны, оптимальный с точки зрения обеспечения максимальных излучающих свойств при минимальной массе и стоимости конструкции;

5) сформулированные выше выводы справедливы только для конструкции антенной решётки, изображённой на рис. 1;

6) антенные решётки подходят для применения практически в любом диапазоне волн, однако, как показали вышеприведённые исследования, для каждой частоты существует лишь одно оптимальное соотношение размеров. Поэтому в случае необходимости работы одной антенны на разных частотах эффективно излучаемых волн, конструкция антенны должна представлять из себя массив из нескольких антенных решёток указанной конструкции (рис. 1), имеющих разные размеры элементов.

Подводя итог, можно констатировать выполнение следующих задач:

- проведено обоснование эффективности антенных решёток с точки зрения простоты создания практически любой требуемой диаграммы направленности;

- составлен алгоритм и написан код программы для расчёта антенны, с использованием необходимых для этого модулей и функций языка Python;

- проведён сравнительный анализ результатов построения диаграмм направленности при варьировании исходных характеристик антенной решётки;

- даны рекомендации по оптимальному выбору конструкции антенной решётки, не требующей смены диаграммы направленности в процессе эксплуатации.

Проведённая работа доказывает простоту и наглядность применения языка программирования Python при исследовании диаграмм направленности антенных решёток. Описанный в статье подход целесообразно применять также для оптимальной

разработки прочих типов антенн и других технических устройств.

С помощью языка Python возможно дальнейшее совершенствование разработанного программного продукта. В частности, можно использовать его в качестве базы для разработки антенных решёток с динамическим изменением диаграммы направленности или с применением широкополосных излучателей [10], при этом понадобятся описанные в статьях [11, 12] дополнительные модули для Python.

### Список литературы

1. Гибалина З.С., Фадеев В.А. Концепция формирования диаграммы направленности фазовых антенных решёток на основе применения голограммных дифракционных решёток // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 14.
2. Конов К.И. Двукратное расширение главного лепестка диаграммы направленности линейной антенной решётки фазовым методом // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 523–526.
3. Балагуровский В.А., Кондратьев А.С., Маничев А.О., Полищук Н.П. Фазовый синтез диаграммы направленности фазированной антенной решётки измерителя координат // Вестник воздушно-космической обороны. 2016. № 4 (12). С. 35–41.
4. Дмитриев Д.Д., Карцан И.Н. Адаптивные антенные решётки с цифровым формированием луча // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 263–265.
5. Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решёток. Самара: ПГУТИ, 2011. 56 с.
6. Корытников М.Ю. Расчет и исследование направленных характеристик синфазной антенной решетки // Студенческая наука для развития информационного общества: сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции: в 2-х т. 2016. С. 99–102.
7. Пылов П.А., Протодаьяконов А.В. Использование и представление массивов в библиотеке Numpy // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 258–266.
8. Ильичев В.Ю., Гридчин Н.В. Визуализация масштабируемых 3D-моделей с помощью модуля Matplotlib для Python // Системный администратор. 2020. № 12 (217). С. 86–89.
9. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. 2 изд., доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
10. Драч В.Е., Родионов А.В., Чухраев И.В., Кузнецова Д.А. Моделирование антенной решетки на широкополосных излучателях // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 1. С. 74–77.
11. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14–18.
12. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Анализ массивов данных с использованием библиотеки Pandas для Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 4. С. 41–45.

УДК 53.089.6

## АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОВЕРОЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА И ДАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ЦЕНТРА МЕТРОЛОГИИ В ГОРОДЕ СЕВАСТОПОЛЕ

**Белая М.Н., Юдина Т.В.**

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь,  
e-mail: belaya\_079@mail.ru*

В статье рассмотрена поверочная лаборатория измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе. Основными заказчиками метрологических услуг (метрологических работ) являются судоремонтные предприятия, судостроительные предприятия, учреждения военно-медицинской службы (поликлиники, госпитали, войсковые части), корабли, суда обеспечения, войсковые части и отдельные образцы военной техники. Для осуществления своей деятельности поверочная лаборатория измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе должна периодически подтверждать свою компетентность, соответствие требованиям, установленным Министерством обороны Российской Федерации к воинским частям и подразделениям, осуществляющим деятельность в области обеспечения единства измерений. В статье представлен анализ области деятельности поверочной лаборатории измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе. Проведен причинно-следственный анализ и построена диаграмма, отображающая взаимосвязи между качеством результата проверки средств измерений и причинами, влияющими на данное качество. Определены основные факторы: персонал, методы, эталоны, условия проведения. Для каждого основного фактора определены влияющие факторы. Используя результаты причинно-следственного анализа, предлагается разработать номенклатуру показателей, характеризующих качество проведения проверки средств измерений, что позволит лабораториям проводить самооценку своей деятельности (аудит процесса). Рассмотрена возможность применения контрольных карт при оценивании стабильности для исследования измерительного процесса проверки.

**Ключевые слова:** проверка, измерение, средство измерения, рабочее средство измерения, образцовое средство измерения

## ANALYSIS OF THE METROLOGICAL ACTIVITY OF THE VERIFICATION LABORATORY OF VACUUM AND PRESSURE MEASUREMENT OF THE TERRITORIAL CENTER OF METROLOGY IN THE CITY OF SEVASTOPOL

**Belaya M.N., Yudina T.V.**

*Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: belaya\_079@mail.ru*

The article discusses the verification laboratory for measuring vacuum and pressure of the Territorial Center of Metrology in the city of Sevastopol. The main customers of metrological services (metrological works) are ship repair enterprises, shipbuilding enterprises, military medical service institutions (clinics, hospitals, military units), ships, supply vessels, military units and individual samples of military equipment. To carry out its activities, the verification laboratory for measuring vacuum and pressure of the Territorial Center of Metrology in the city of Sevastopol must periodically confirm its competence to the requirements established by the Ministry of Defense of the Russian Federation for military units and subdivisions carrying out activities in the field of ensuring the uniformity of measurements. The article presents an analysis of the scope of activities of the verification laboratory for measuring vacuum and pressure of the Territorial Center of Metrology in the city of Sevastopol. A causal analysis was carried out and a diagram was built showing the relationship between the quality of the result of verification of measuring instruments and the reasons that affect this quality. The main factors are determined: personnel, methods, standards, conditions of conduct. For each major factor, influencing factors are identified. Using the results of the cause-and-effect analysis, it is proposed to develop a nomenclature of indicators characterizing the quality of the verification of measuring instruments, which will allow laboratories to conduct a self-assessment of their activities (process audit). The possibility of using control charts in assessing stability for the study of the measuring process of verification is considered.

**Keywords:** verification, measurement, measuring instrument, working measuring instrument, model measuring instrument

Лаборатория проверки средств измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе проводит проверку рабочих и образцов средств измерений (СИ), техническое обслуживание и ремонт СИ для судоремонтных и судостроительных предприятий, учреждений военно-медицинской службы, кораблей, судов обеспечения, войсковых

частей и отдельных образцов военной техники. Для осуществления деятельности в области обеспечения единства измерений лаборатория должна иметь оборудование, средства измерения, программное обеспечение, эталоны, и вспомогательные устройства, что необходимо для надлежащего осуществления лабораторной деятельности [1, 2].

Цель исследования: рассмотреть деятельность поверочной лаборатории измерения вакуума и давления территориального центра метрологии в г. Севастополе. Провести причинно-следственный анализ и выявить факторы, влияющие на качество результата поверки.

#### Материалы и методы исследования

РМГ 128-2013 гласит, что обеспечение выполнения обязательных требований к рабочим условиям в помещениях для лабораторий, осуществляющих измерения (стабильная температура, низкий уровень вибрации и т.д.), закладывают на стадии проектирования лаборатории [3].

Поверочное подразделение Территориального центра метрологии размещено в специальном здании вдали от высоковольтных линий электропередач, контактной электросети (электротранспорта), источников вибрации, шума (с уровнем выше 90 дБ), радиопомех (электросварочного и высокочастотного электрооборудования) и от объектов, создающих сильные магнитные или электрические поля (преобразовательных подстанций, установок индукционного нагрева и т.п.) [4].

Лаборатория поверки средств измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе оснащена рабочими местами, оборудованием и необходимыми условиями для проведения работ. Помещение для поверки и условия окружающей среды являются пригодными для осуществления лабораторной деятельности и не оказывают не-

гативного влияния на достоверность получаемых результатов. Общие требования к помещению установлены в Инструкции по технике безопасности при поверке средств измерения давления, вакуумных средств измерения. Инструкция находится непосредственно в данном помещении. Согласно ей, все поверочное оборудование на рабочих местах, предназначенных для снятия градуировочных характеристик, устанавливается таким образом, чтобы была обеспечена безопасность обслуживания оборудования и удобство наблюдения за показаниями поверяемых и образцовых приборов. Установлены требования, соблюдение которых необходимо перед началом, во время и по окончании работы. Так, например, перед началом работы в лаборатории должны находиться инструменты и другие вещи, предназначенные для работы с приборами измерения вакуума и давления (гаечные ключи, ветошь, отвертки), защитные средства (халаты, защитные кремы для рук). Гидропресс устанавливается на прочном основании, не подвергающемся вибрации, а грузы хранятся в месте, исключающем их самопроизвольное смещение. При установке и снятии манометров с пресса следует пользоваться двумя исправными ключами. По окончании работы рабочее место приводится в порядок, а промасленная ветошь убирается из помещения с целью предотвращения ее самовозгорания.

Лаборатория имеет перечень закрепляемой за личным составом измерительной техники, представленный в таблице.

Перечень измерительной техники

№	Наименование ценности	Тип	Категория
1	Манометр грузопоршневой	МП-0,4	2
2	Манометр грузопоршневой	МВП-2,5	2
3	Манометр грузопоршневой	МП-6	2
4	Манометр грузопоршневой	МП-60	2
5	Манометр грузопоршневой	МП-600	2
6	Манометр грузопоршневой переносной	МПП-60М	2
7	Микроманометр	МКВ-250	2
8	Калибратор избыточного давления	КИД-П-5	2
9	Измерительный микроскоп	МПБ-2	2
10	Секундомер механический	СОПрр-2а	2
11	Индикатор часового типа	ИЧ-10	2
12	Гигрограф	М-21АН	2
13	Психрометр аспирационный	МВ-4М	2
14	Термометр ртутный	ТЛ-4	2
15	Набор гирь	Г-3-21,105; Г-4-1110; Г-3-210; МГ-4-1110-10	2

Также имеется перечень вспомогательного оборудования и ЗИП, в который входит газожидкостная разделительная камера, вакуумный насос и камера «Индрика».

В итоге в поверочной лаборатории должны находиться и храниться следующие инструкции:

- инструкция «Общие меры электробезопасности»;
- инструкция по технике безопасности при поверке средств измерения давления и вакуума;
- инструкция по технике безопасности при поверке кислородных манометров;
- инструкция по оказанию первой помощи при поражении электрическим током;
- инструкция по мерам пожарной безопасности.

За каждым прибором закреплено место эксплуатации (хранения) и ответственный за эксплуатацию.

Каждое рабочее место аттестовано и имеет паспорт. Например, Паспорт на рабочее место № 11.1.1 по аттестации (поверке) кислородных манометров цифровых, манометров и вакуумметров деформационных с условными шкалами ВО, МО. Такая документация также находится в данном помещении. В паспорте содержится описание рабочего места. Так, рабочее место РМ № 11.1.1 предназначено для аттестации (поверки) кислородных средств измерений давления и вакуума:

- манометры цифровые 3 и 4 разряда;
- манометры и вакуумметры деформационные с условными шкалами ВО, МО 3 и 4 разряда.

Указаны требования к условиям окружающей среды [5]:

- температура  $20 \pm 2$  °С;
- относительная влажность 30–80 %;
- атмосферное давление  $710 \pm 80$  мм рт. ст.;
- напряжение  $220 \pm 4,4$  В;
- частота сети  $50 \pm 0,5$  Гц.

Требования, устанавливаемые для помещений и условий окружающей среды [6], необходимых для осуществления лабораторной деятельности, должны быть документированы. Также лаборатория должна осуществлять мониторинг условий окружающей среды, управлять ими и регистрировать их в соответствии с техническими требованиями, методами и методиками в случаях, когда они влияют на достоверность результатов [6, 7]. Для соблюдения данных требований ведется журнал температурно-влажностного режима (ТВР), также находящийся постоянно в лаборатории измерения вакуума и давления. Для этого в помещении имеется комплект средств измерений поста ТВР, а именно

термометр, гигрограф, психрометр аспирационный. Комплект документации поста ТВР содержит:

- подшитые использованные с начала года ленты гигрографа;
- журнал учета температуры;
- копии свидетельств о поверке средств измерений поста ТВР.

Средства измерения размещены на высоте 1500 мм от пола, в местах, исключающих прямое воздействие отопительных систем, наружного воздуха и вибраций. Периодичность учета параметров окружающей среды в соответствии с требованиями нормативно-технической документации на аттестацию эталонов (поверку средств измерений), но не реже 1 раза в 3 часа, например в 9.00, 12.00, 15.00.

Важную роль в лаборатории играет освещенность рабочих мест. Коэффициент естественной освещенности на поверхности стола поверителя допускается в пределах 1,00–1,50. Условия обеспечиваются таким образом, чтобы дневной свет в помещении был рассеянным и не давал бликов, для чего на окнах установлены жалюзи. Окна в помещениях, где поверяют средства измерений вакуума и давления, рекомендуется располагать на северной стороне здания. Стены до 3/4 их высоты окрашивают масляной краской светлых тонов, остальную часть стен и потолков – белой прочной краской, допускающей протирку [4]. В данной лаборатории цвет стен светло-зеленый. Для полов помещения не установлены специальные требования, поэтому они застелены линолеумом.

На каждом рабочем месте имеется локальная поверочная схема, которая регламентирует методы, средства и погрешности передачи единицы избыточного давления.

Помимо оборудования и средств измерений, поверочная лаборатория оснащена необходимой мебелью. Мебель указана в описи материальных ценностей данного помещения. К материальным ценностям поверочной лаборатории измерения вакуума и давления относятся, например, столы (универсальные и приставные), стулья, стеллажи, шкафы (металлические и стеклянные), огнетушитель, кондиционер, жалюзи вертикальные, щит распределительный, компьютер, принтер и др.

Поверочная лаборатория измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе полностью соответствует требованиям, установленным Министерством обороны Российской Федерации к воинским частям и подразделениям, осуществляющим деятельность в области обеспечения единства измерений.

### Результаты исследования и их обсуждение

На протяжении пяти лет лаборатория в заявленной сфере деятельности имеет право проводить работы по обеспечению единства измерений, и, соответственно, на протяжении данного времени лаборатория должна обеспечить точность и достоверность проведенных работ.

От качества измерительного процесса зависит правильность принимаемых решений по проведению поверки средств измерения в поверочной лаборатории измерения вакуума и давления Территориального центра метрологии в г. Севастополе.

По существу, измерительный процесс – это процесс, преобразующий значение измеряемого параметра в результат измерения посредством использования определенных ресурсов. К ресурсам деятельности поверочной лаборатории измерения вакуума и давления, в соответствии с методикой выполнения измерения, относятся средства измерительной техники, вспомогательное оборудование [8], операторы (сотрудники лаборатории или поверители), окружающая среда, рассмотренные выше в данной работе. Значительный вклад в правильное выполнение процедур поверки вносит взаимодействие сотрудников лаборатории, используемые средства измерения, применяемые методы измерения и условия среды, в результате которого происходит измерение, т.е. поверка. На рис. 1 представлена простейшая схема измерительного процесса – поверка СИ.

Характеристикой качества измерений (проведения поверки) является точность и достоверность измерений. В соответствии с РМГ 29-2013 под точностью измерений

понимают «...близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины» [9], т.е. точность измерений характеризуется правильностью и прецизионностью (сходимость и воспроизводимость) результатов измерений [7].

Для получения точных и достоверных результатов поверки лаборатории целесообразно оценивать стабильность измерительного процесса (стабильность процесса поверки рабочих и образцовых СИ), т.е. определение статистически управляемого процесса. Проведение измерений при поверочных работах, находящихся в статистически управляемом состоянии, характеризуется тем, что ход процесса предсказуем, смещение среднего арифметического значения измеряемой величины либо отсутствует (рис. 2, а), либо имеет постоянное значение во времени, и разброс значений измеряемой величины находится в прогнозируемых пределах [8]. Нестабильное состояние проведения поверки может характеризоваться различными факторами, влияющими на качество проведения поверки (рис. 2, б).

Для исследования измерительного процесса поверки на стабильность целесообразно применять контрольные карты средних и размахов [10, 11].

Для выявления причин изменчивости измерительных процессов предлагается выявить факторы, влияющие на качество результата поверки (рис. 3). Для выявления факторов применяется причинно-следственная диаграмма [12].

На рис. 3 представлена причинно-следственная диаграмма, отображающая взаимосвязи между качеством результата поверки СИ и причинами, влияющими на данное качество.



Рис. 1. Модель поверки СИ



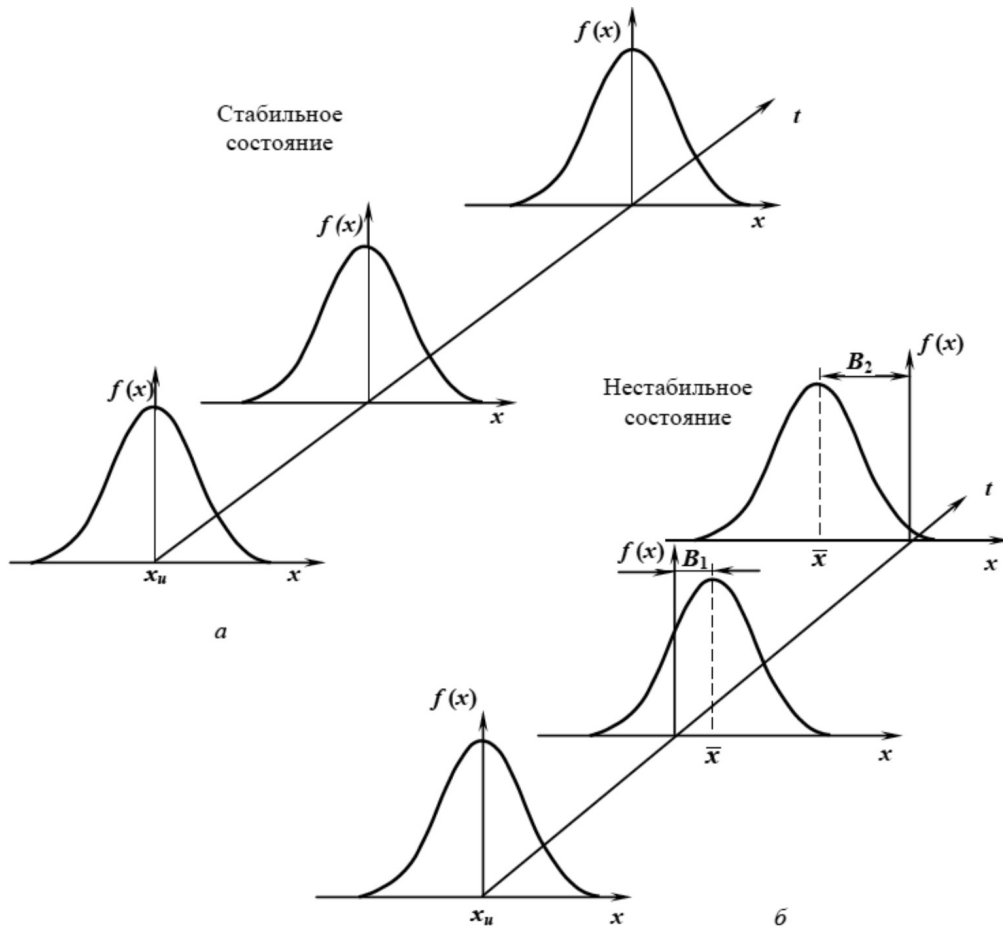


Рис. 2. Схематическое изображение состояния измерительных процессов

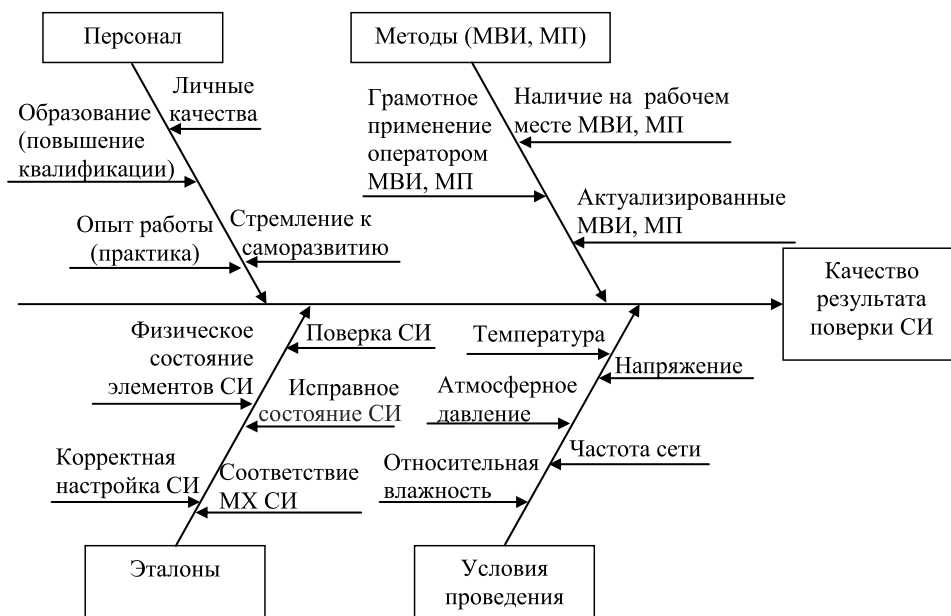


Рис. 3. Факторы, влияющие на качество результата поверки СИ

### Заключение

Причинно-следственная диаграмма построена на основании применения метода мозгового штурма, который дал возможность выявить ключевые факторы процесса, влияющие на качество результата поверки СИ, что позволит провести следующие исследования:

1) разработать номенклатуру показателей, характеризующих качество проведения поверки СИ, что позволит лабораториям проводить самооценку своей деятельности (аудит процесса);

2) оценить стабильность для исследования измерительного процесса поверки при использовании контрольных карт.

### Список литературы

1. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями на 8 декабря 2020 года) (редакция, действующая с 1 января 2021 года) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902107146?section=text> (дата обращения: 01.04.2021).
2. Болдырев И.В. О новой редакции ISO/IEC 17025 // Контроль качества продукции. 2017. № 6. С. 29–36.
3. РМГ 128-2013 ГСИ. Требования к созданию лабораторий, осуществляющих испытания и измерения. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
4. ПР 50.2.014-2002. ГСИ. Правила проведения аккредитации метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений. М.: Госстандарт России, 2003. 34 с.
5. Бакулина А.Н., Фоменко И.А. Разработка методики калибровки вольтметров постоянного тока и оценивание неопределенности результатов измерений // Сборник научных трудов: Вестник современных технологий. 2017. № 8. С. 4–10.
6. ГОСТ 8.395-80 ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.
7. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
8. Правиков Ю.М., Муслина Г.Р. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие. М.: КноРус, 2016. 237 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://book.ru/book/919624> (дата обращения: 01.04.2021). Текст: электронный.
9. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
10. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011 Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
11. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015 Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 2. Контрольные карты Шухарта. М.: Стандартинформ, 2016. 46 с.
12. Васин С.Г. Управление качеством. Всеобщий подход: учебник для бакалавриата и магистратуры. М.: Издательство Юрайт, 2019. 404 с. (Бакалавр и магистр. Академический курс). Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/bcode/425062> (дата обращения: 29.03.2021).