

# РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НЕЙРОЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА

## CALCULATING THE RELIABILITY AND FUNCTIONAL EFFICIENCY OF THE HYDROACOUSTIC EQUIPMENT IN THE NEURAL EXPERT MARINE MONITORING SYSTEM

V. Pyatakovich

*Summary.* The calculation of reliability of the hydroacoustic equipment used as part of a neural network expert system to classify the physical fields sources when monitoring water areas is presented. The technical means recoverability assessment for the statistical estimation of reliability, by calculating the average recovery time, is discussed. An algorithm for calculating the reliability of technical systems depending on the reliability of their elements is described. Determined from the hydroacoustic equipment operation experience, the confidence intervals for the changes in the mean group failure rates of the main technical elements are shown. The calculation results of the average time between failures of individual units and of the entire equipment set are presented.

*Keywords:* technical means good working order probability; reliability characteristics; trouble-free operation; technical means recoverability assessment; equipment failure rate; recognition factor; environmental durability of the equipment.

**Пятакович Валерий Александрович**

К.т.н., доцент, профессор АВН, ФГКБОУ ВО «ТОВВМУ  
имени С. О. Макарова» (г. Владивосток)  
pva.877com@mail.ru

*Аннотация.* в работе представлен расчет надежности гидроакустической аппаратуры, используемой в структуре нейросетевой экспертной системы для классификации источников физических полей при мониторинге акваторий. Рассмотрен учет возможностей восстанавливаемости технических средств при статистической оценке надежности, осуществляемый путем вычисления среднего времени восстановления. Описан алгоритм расчета надежности технических систем по надежности их элементов. Показаны доверительные интервалы изменения среднегрупповых интенсивностей отказов основных технических элементов, определенные из опыта эксплуатации гидроакустической аппаратуры. Приведены результаты расчетов среднего времени наработки на отказ отдельных блоков и всего комплекта аппаратуры в целом.

*Ключевые слова:* вероятность работоспособного состояния технических средств; надежность характеристики; безотказное функционирование; возможности восстанавливаемости технических средств; интенсивность отказов аппаратуры; коэффициент распознавания; стойкость аппаратуры к внешним воздействиям.

**П**онятие «повышение надежности и стойкости к внешним воздействиям» гидроакустической аппаратуры включает в себя проведение таких мероприятий, результатом которых является улучшение количественных показателей, прямо или косвенно характеризующих данное свойство, а именно вероятности безотказной работы, интенсивности отказов, времени восстановления ресурса и сроков службы, комплексных показателей надежности и т.д. [1, 2].

Надежность аппаратуры определяется надежностью микросхем, диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов, печатных плат, разъемов и вспомогательных элементов схем [3]. Расчет надежности гидроакустической аппаратуры, как правило, сводят к определению зависимости вероятности их безотказной работы от времени эксплуатации  $P(t)$  по известным надежностным характеристикам составляющих их элементов (блоков) узлов и т.д.).

Вообще говоря, большинство типов гидроакустической аппаратуры, поддается восстановлению и в самом общем случае при априорной оценке надежности следует учитывать возможности восстановления работоспособного состояния, включающие как техническое, так и организационно-материальное обеспечение. В этом случае вероятность работоспособного состояния аппаратуры с учетом ее восстанавливаемости при возникновении отказов  $P_0(t)$  может быть найдена с помощью соотношения

$$P_0(t) = P(t) + [1 - P(t)]P_v(t_B \leq \tau_d),$$

где  $P_v(t_B \leq \tau_d)$  — вероятность восстановления работоспособности за время, не превышающее допустимое.

Сложность учета возможностей восстановления при ведении инженерных расчетов надежности обуслови-

Таблица 1. Интервалы изменения среднегрупповых интенсивностей отказов основных элементов

№ п\п	Наименование элемента	$\lambda \cdot 10^5 \text{ч}^{-1}$
1	Электроввакуумные приборы	0,1–34,5
3	Конденсаторы	0,001–16,4
4	Трансформаторы	0,002–6,4
6	Полупроводники	0,012–50
7	Коммутационные устройства	0,003–2,8

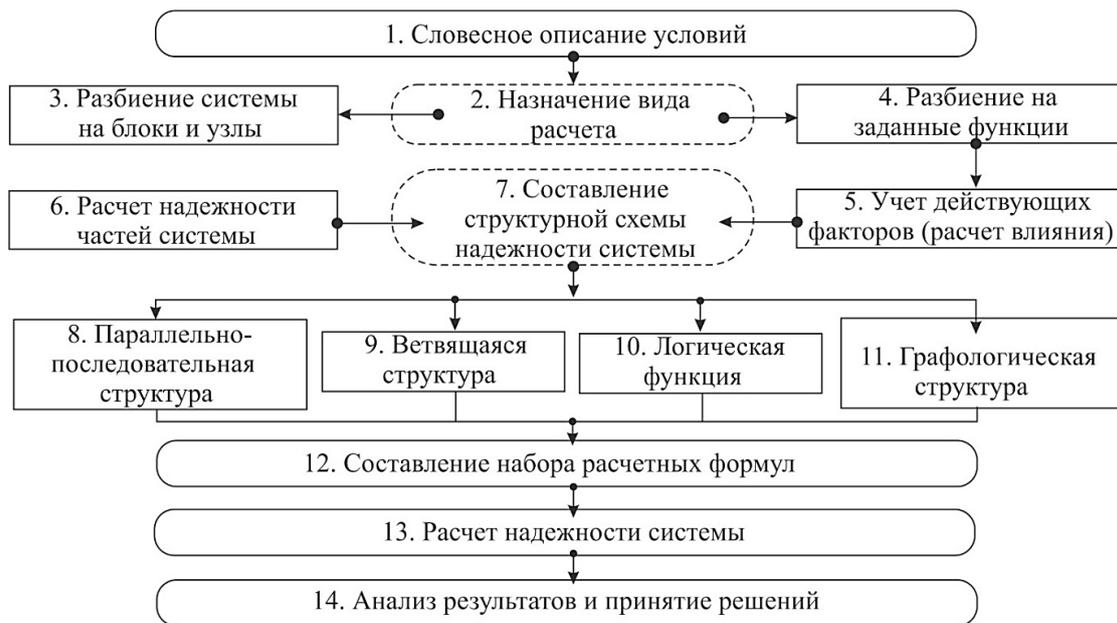


Рис. 1. Алгоритм расчета надежности

дает большее распространение методов расчета надежности без учета восстанавливаемости, т.е. вероятности неоявления отказа в функции времени или вероятности того, что время безотказного функционирования превысит текущее время  $t$ , с последующей оценкой характеристик восстановления. Это в первую очередь относится к расчетам, выполняемым при проектировании средств для предварительной оценки соответствия их надежности требованиям тактико-технического задания и определения элементной базы в процессе производства. Учет возможностей восстанавливаемости технических средств при статистической оценке надежности осуществляется путем вычисления среднего времени восстановления. Алгоритм расчета надежности технических систем по надежности их элементов представлена на рис. 1.

Расчет надежности при проектировании технических средств может выполняться, во-первых, с точки зрения определения априорной вероятности по средне групповой интенсивности отказов используемой в процессе производства элементной базы и, во-вторых, определения требований по интенсивности отказов отдельных элементов по заданной надежности. В первом случае

решение задачи сводится к построению основной надежности схемы рассматриваемой системы и расчету  $P(t)$  в соответствии с соотношением

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^N \bar{\lambda}_i(t) dt \right\},$$

где  $\lambda_i(t)$  — средне групповая интенсивность отказов  $i$ -го элемента при их основном надежном соединении.

В таблице 1, приведены доверительные интервалы изменения среднегрупповых интенсивностей отказов основных радиотехнических элементов, определенные из опыта эксплуатации РЭС.

Основная надежность схема гидроакустической аппаратуры комплексов при оценке надежности трактов шумопеденгования существенно отличается от функциональной структурной схемы видом соединения элементов узлов и блоков. Так, например, параллельно соединенные группы электроакустических преобразо-

вателей на структурной схеме оказываются соединенными последовательно, так как выход из строя одной из них приводит к отказу (резкому искажению диаграммы направленности и выходу за пределы допусков характеристик направленных свойств антенны) всей вертикальной группы приемников и т.д.

Исходными данными для расчета надежности по среднегрупповым интенсивностям отказов является количество блоков  $Q$ , категорий элементов  $q$ -го блока  $L_q$ , групп элементов в  $ql$ -й категории  $M_{ql}$ , и, наконец, элементов в  $qlm$ -й группе  $N_{qlm}$ , а также среднегрупповая интенсивность отказов составляющих элементов  $\bar{\lambda}_{qlmi}$ .

Порядок расчета:

- ♦ выявляется наименование всех категорий элементов по блокам и проводится разбивка категорий на группы с примерно одинаковой интенсивностью отказов (коэффициент вариации не более 0,1);
- ♦ определяются значения  $N_{qlm}, M_{ql}, L_q, Q$ ;
- ♦ выбираются среднегрупповые интенсивности отказов на основе известных данных по эксплуатации сходных технических систем  $\bar{\lambda}_{qlmi}$ ;
- ♦ вычисляются значения интенсивностей отказов группы  $\bar{\lambda}_{qlm} = N_{qlm} \bar{\lambda}_{qlmi}$  категории

$$\bar{\lambda}_{ql} = \sum_{m=1}^{M_{ql}} \bar{\lambda}_{qlmi}$$

блока

$$\bar{\lambda}_q = \sum_{l=1}^{L_q} \bar{\lambda}_{ql}$$

и результирующая интенсивность отказов системы в целом

$$\bar{\Lambda} = \sum_{q=1}^Q \bar{\lambda}_q;$$

- ♦ определяется средняя наработка между отказами  $T_0 = 1/\bar{\Lambda}$  и зависимость вероятности безотказной работы в функции времени.

Полученное значение  $P(t)$  и  $t = t_{max}$  и является искомой величиной, которая сравнивается с заданной в ТЗ.

Исходными данными при выполнении расчетов на заданную надежность являются значения  $P_0(t_0)$ , ко-

личество блоков  $Q$  категорий  $L_q$ , групп  $M_{ql}$  и элементов  $N_{qlm}$ .

Порядок расчета:

- ♦ определяется результирующая интенсивность отказов работы системы по соотношению  $\Lambda_0 = |\ln P_0(t_0)|/t_0$ ;
- ♦ допустимое значение интенсивностей отказов отдельного блока находят в виде взвешенного значения средней интенсивности  $\lambda_q = \alpha_q \lambda_0 = \alpha_q \Lambda_0 / Q$  в котором весовой коэффициент  $\alpha_q$  находят по статистическим данным эксплуатации сходных систем с учетом числа элементов в блоках и соблюдением условия

$$\sum_{q=1}^Q \alpha_q = Q;$$

- ♦ допустимое значение интенсивностей отказов  $l$ -й категории  $q$ -го блока находят по соотношению  $\lambda_{ql} = \alpha_l \lambda_q = \alpha_{ql} \lambda_q / L_q$ , — где  $\alpha_{ql}$  — весовой коэффициент, определяемый, как и в первом случае, но с учетом условия

$$\sum_{l=1}^{L_q} \alpha_{ql} = L_q;$$

- ♦ допустимое значение интенсивностей отказов группы элементов равно  $\lambda_{qlm} = \alpha_{qlm} \lambda_{ql} = \alpha_{qlm} \lambda_q / M_{ql}$  при условии

$$\sum_{m=1}^{M_{ql}} \alpha_{qlm} = M_{ql};$$

- ♦ допустимое значение интенсивностей отказов одного элемента в группе  $\lambda_{qlmi} = \lambda_{qlm} / N_{qlm}$ .

Доведение расчета до значения интенсивности отказов элементов позволяет оценить возможности использования тех из них, которые обеспечивают заданные требования по надежности  $P_0(t_0)$ .

Если допустимые значения  $\lambda_{qlmi}$  меньше интенсивности отказов элементов, имеющих в распоряжении у проектировщика, то применяют меры по повышению надежности, в первую очередь схемные, для удовлетворения поставленных требований.

Оценка надежности в процессе эксплуатации РТВ сводится к статистической обработке результатов эксплуатации, а именно фактических значений  $T_{0i}$  и  $T_{ei}$ .

Порядок расчета:

- ♦ определяется величина интервалов группирования времени наработки  $T_{0\ min}$  и  $T_{0\ max}$  и восстановления  $T_{0\ min}$  и  $T_{0\ max}$ ;
- ♦ подсчитывается число значений  $T_{0i}$  и  $T_{ei}$  в каждом интервале;
- ♦ строится полигон случайных величин  $T_{0i}$  и  $T_{ei}$  и выбирается аналитическая аппроксимирующая функция для  $T_0$  и  $T_e$  и проверяется ее соответствие фактическим данным по одному из критериев согласия;
- ♦ рассчитываются статистические оценки показателей надежности  $\bar{T}_{0i}$ ,  $\bar{T}_{ei}$ ,  $k_r$ ,  $k_c$  и их доверительные интервалы по заданной или выбранной при расчете доверительной вероятности;
- ♦ для доверительных границ  $(\bar{T}_{01}, \bar{T}_{02})$  и  $(\bar{T}_{e1}, \bar{T}_{e2})$  рассчитываются доверительные области для  $P(t)$  и  $P_e(t)$  по соотношениям:  
 $P_1(t) = \exp(-t / T_{01}); P_2(t) = \exp(-t / T_{02});$   
 $P_{e1} = 1 - (1 + 2t / T_{e1}) \exp(-2t / T_{e1});$   
 $P_{e2} = 1 - (1 + 2t / T_{e2}) \exp(-2t / T_{e2});$

Полученные данные служат основой для сравнительной оценки одно- и разнотипных средств, установленных на одинаковых и различных носителях (системах, объектах) применительно к конкретным условиям эксплуатации. Выше уже отмечалось, что флуктуации технических параметров и характеристик внешние факторы, влияющих на эффективность гидроакустических средств, обуславливают необходимость ее вероятностной оценки.

При этом основную сложность составляет определение плотностей распределения вероятностей случайной величины, которая функционально, чаще всего мультипликативно, связана с другими случайными величинами, плотность распределения вероятностей которых находят в итоге статистической обработки результатов измерений. Функциональная связь рассматриваемых параметров, например, коэффициента распознавания  $\delta$  и определяющих его и поддающихся контролю в процессе эксплуатации порогового коэффициента  $k_\delta$  и параметров канала временной обработки  $\Delta f$  и  $T$ , выражаемая для режима шумопеленгования соотношением

$$\delta = \sqrt{k_\delta} / \sqrt{\Delta f T}$$

может быть представлена в общем виде

$$A = a_0, a_1^{k_1}, \dots, a_n^{k_n} = a_0 \prod_{i=1}^n a_i^{k_i} \quad (2)$$

Аналитическое определение плотности распределения величины  $A$ , встречает значительные трудности, которые могут быть преодолены, если перейти от точных математических выражений к их аппроксимации с допустимой погрешностью.

Известно [2, 8], что плотность распределения случайной величины, являющейся произведением нескольких других случайных величин, коэффициенты вариации которых отличаются незначительно, лучше всего, в среднеквадратическом смысле, аппроксимируется логарифмически-нормальным законом:

$$f(A) = \frac{1}{2,3\sqrt{2n}A\sigma_{lgA}} \exp\left[-\frac{(lgA - lgA_0)^2}{2\sigma_{lgA}^2}\right]$$

Следовательно, решение задачи определения плотности распределения вероятностей  $f(A)$  сводится к установлению зависимости математического ожидания  $lgA_0$  и дисперсии  $\sigma_{lgA}^2$  от статистических характеристик  $(m_i, D_i)$  случайных величин сомножителей.

Показано [2], что при  $k_i = 1$  (для  $i \geq 1$ ) можно пользоваться соотношениями (3).

Необходимо учесть, что в произведение случайные величины  $a_i$ , как правило, входят со своими показателями степени, поэтому полученные в процессе измерений статистические характеристики величин  $a_i$  — должны быть пересчитаны по общей формуле определения плотности распределения значений функций случайной величины  $\varphi(a)$  по известной плотности распределения значений аргумента, т.е.  $f(a)$  в виде  $f(A) = f[\varphi(A)][\varphi'(A)]$  где  $\varphi(A)$  — функция, обратная случайной  $\varphi(a)$ .

Так, при  $A = \varphi(a) = a^k$  и  $f(a) = 1 / (a_2 - a_1) \varphi(A) = A^{1/k}$ , а искомая плотность распределения  $f(A) = A^{1/k-1} / (a_2 - a_1)k$ .

$$\left. \begin{aligned} & - \text{при } n = 2 \\ m_A &= k_0 m_1 m_2; D_A = k_0^2 (D_1 D_2 + m_1^2 D_2 + m_2^2 D_1); \\ & - \text{при } n = 3 \\ m_A &= k_0 m_1 m_2 m_3; D_A = k_0^2 (D_1 D_2 D_3 + m_1^2 D_2 D_3 + \\ & + m_2^2 D_1 D_3 + m_3^2 D_2 D_1 + m_1^2 m_2^2 D_3 + m_1^2 m_3^2 D_2 + m_2^2 m_3^2 D_1). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Так как в конечном итоге необходимо определить значения  $m_A$  и  $D_A$ , то в результате применения известных преобразований получим (4).

Проиллюстрируем применение рассмотренной методики при оценке эффективности функционирования тракта ШП ГАК, которая определяется значением своего обобщенного параметра — коэффициента распознавания  $\delta$ .

В свою очередь, этот параметр выражается через другие, подвергающиеся контролю в процессе эксплуатации, в виде

$$\delta = k_\delta / \sqrt{\Delta f T}.$$

Пусть в результате контроля получено, что  $k_\delta$  имеет логнормальное распределение с параметрами  $m_{k_\delta} = 2,2$ ,  $\delta_{k_\delta} = 0,3$ ;  $\Delta f$  и  $T$  — равномерное с параметрами  $m_{\Delta f} = 1,5 \cdot 10^3$ ,  $\sigma_{\Delta f} = 0,2 \cdot 10^3$ ;  $m_T = 20$ ,  $\sigma_T = 2$ .

Вычисляя по приведенным выше соотношениям промежуточные значения, получим:

$$m_2 = 0,026, \quad D_2 = 3,9 \cdot 10^{-6}, \\ m_3 = 0,205, \quad D_3 = 0,005.$$

Результатом расчета является определение значений  $m_\delta$ ,  $D_\delta$  и построение графической зависимости функции распределения вероятностей коэффициента распознавания  $F(\delta)$ , для чего воспользуемся выражениями (3).

$$\text{Получим } m_\delta = 0,012, \quad D_\delta = 0,9 \cdot 10^{-5}$$

Построение графика функции  $F(\delta)$  подчиняющейся логнормальному закону, можно произвести с использованием таблиц нормального закона (интеграла Лапласа) после соответствующего пересчета значений  $m_\delta$  и  $D_\delta$  по соотношениям (5).

Как можно видеть, сравнительно небольшие флюктуации отдельных технических параметров тракта шумо-

пеленгования ( $k_\delta$ ,  $\Delta f$ ,  $T$ ) — коэффициент вариации каждого из них в отдельности не превышает 10% — привели к существенным изменениям обобщенного параметра (коэффициента распознавания  $\delta$ ), коэффициент вариации которого составил около 25%.

Оценивая эффективность функционирования данного тракта в заданных условиях использования и эксплуатации ( $p_c = 0,3$  Па;  $Af = 1$ ;  $p_{no} = 0,005$  Па) получим, что при обеспечении обнаружения цели на дальности не менее 30 км показатель эффективности окажется равным 0,65.

В заключение целесообразно проиллюстрировать вышесказанное расчетами интенсивности отказов различных элементов, (см в табл. 2, 3).

Приведенные расчеты показывают, что наработка на отказ морской части (донной части) аппаратуры гидроакустического канала связи и всплывающих модулей системы спутниковой связи (ВМССС) составляет 69500 часов, что значительно больше задаваемого в технических заданиях (5000 часов) [9].

Суммарная интенсивность отказов аппаратуры определена в таблице 2.

Результаты расчетов среднего времени наработки на отказ отдельных блоков, всего комплекта аппаратуры в целом и вероятность безотказной работы аппаратуры за время 5000 часов [11] приведены в таблице 3.

Если принять, что время наработки на отказ должно быть 5000 часов, что требуется по техническому заданию [11], то полученные расчетные результаты (69500 часов) значительно превосходят это значение. Необходимо отметить, что ученые и специалисты России в своих исследованиях не ограничиваются традиционной разработкой систем в интересах обеспечения обороны и безопасности страны [4–7, 10].

$$m_A = (a_2^{k+1} - a_1^{k+1}) / (k+1)(a_2 - a_1); \quad D_A = \frac{a_2^{2k+1} - a_1^{2k+1}}{(2k+1)(a_2 - a_1)} - \frac{(a_2^{k+1} - a_1^{k+1})^2}{(k+1)^2(a_2 - a_1)^2}. \quad (4)$$

$$F(\delta) = \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp(-t^2/2) dt; \quad u = \frac{\lg \delta - \lg \delta_0}{\sigma_{\lg \delta}}; \quad (5)$$

$$\delta_0 = m_\delta^2 / \sqrt{m_\delta^2 + D_\delta}; \quad \sigma_{\lg \delta} = \sqrt{\ln \sqrt{1 + D_\delta / m_\delta^2}}.$$

Таблица 2. Результаты расчета суммарной интенсивности отказов аппаратуры

№ п/п	Элементы аппаратуры	Интенсивность отказов $\lambda_{\Sigma} \cdot 10^6$
		Морская часть
1	Интегральные микросхемы	3,72
2	Резисторы	0,191
3	Конденсаторы	5,43
4	Полупроводниковые приборы	4,05
5	Печатные платы	0,21
6	Кварцевые резонаторы	0,34

Таблица 3. Среднее время наработки на отказ и вероятность безотказной работы за 5000 часов

Части аппаратуры ГАКС	X-106	t, ч	t, лет	P(t) (за 5000 ч)
Донная часть(морская часть)	14,3	69500	8,0	0,93
Часть ГАКС — ВМССС	14,3	69500	8,0	0,93

Анализ локальных войн и вооруженных конфликтов последних десятилетий, с комплексным использованием электронных средств приводят специалистов и ученых к выводу: одна из важнейших закономерностей

успеха заключается в том, что ход и исход зависит в определяющей степени от «интеллекта» и надежности боевых информационно-аналитических систем управления противоборствующих сторон [12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пятакович В.А., Василенко А. М., Хотинский О. В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография — Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2017. — 255 с. ISBN978-5-8343-1066-2.
2. Пятакович В.А., Василенко А. М., Мироненко М. В. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. — 190 с. ISBN978-5-7444-3790-9.
3. Пятакович В.А., Андриухин А. В. Экономическая целесообразность замены корабельного оборудования // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — Пенза: ПГУ, 2007. — Т. 2. — С. 203–204.
4. Мироненко М.В., Пятакович В. А., Василенко А. М., Результаты экспериментальных исследований способа определения профиля морского объекта и реализующей его системы. Мониторинг. Наука и технологии. — 2017. — № 2(31) — С. 64–69.
5. Патент 2593624 РФ Радиогидроакустическая система передачи информационных волн из морской среды в атмосферу и обратно: / М. В. Мироненко, А. М. Василенко, В. А. Пятакович; ТОВВМУ им. С. О. Макарова. — Оpubл. 10.08.16. Бюл. № 22.
6. Малашенко А. Е., Мироненко М. В., Чудаков М. В., Пятакович В. А., Просветная радиогидроакустическая система мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры в морской среде. Датчики и системы — М.: 2016. — № 8–9 (206). — С. 9–13.
7. Малашенко А. Е., Мироненко М. В., Чудаков М. В., Пятакович В. А., Дальний параметрический прием электромагнитных волн, формируемых техническими источниками в морской среде. Датчики и системы — М.: 2016. — № 8–9 (206). — С. 14–18.
8. Пятакович В. А., Василенко А. М. Обработка размерности признакового пространства для задач классификации морских технических объектов нейросетевой экспертной системой // Современные наукоемкие технологии. — М.: 2017. № 8. С. 50–55.
9. Филиппов Б. И., Малахова Е. А. Расчет надежности донной части аппаратуры гидроакустического канала связи // сб. науч. трудов НГТУ. — 2015. — № 3(81). — 79–97.
10. Пятакович В. А. Нейро-нечеткие системы и технологии комплексного мониторинга океаносферы // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по матер. II междунар. науч.-практ. конф. № 2(2). — Новосибирск: СибАК, 2017. — С. 45–55.
11. Разработка принципов и устройств передачи геофизической информации по гидроакустическому каналу связи: отчет / НЭИС им. Н. Д. Псурцева; науч. рук.: А. А. Макаров, Л. А. Чиненков. — Новосибирск, 1982. — 76 с. — № ГР 81019632. — Инв. № 02830014986.
12. Пятакович В.А., Хотинский О. В. Национальные интересы России в Мировом океане: монография — Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2009. — 234 с. ISBN978-5-8343-0523-1.

© Пятакович Валерий Александрович (pva.877com@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»