

[текст] / В.Н. Шорохов, М.Ю. Осокин, Е.В. Хекерт: учебное пособие для обучения курсантов (студентов) на факультетах военного обучения (военно-морских кафедрах) гражданских вузов. – Новороссийск "Морская гос. акад. им. Ф. Ф. Ушакова", 2010.

#### REFERENCES

1. Hurricane SALLY Advisory Archive - National Hurricane Center. - Rezhim dostupa: <https://www.nhc.noaa.gov/archive/2020/SALLY.shtml?>
2. 2020 Tropical Cyclone Advisory Archive. - Rezhim dostupa: [https://www.nhc.noaa.gov/archive/2020/SALLY\\_graphics.php](https://www.nhc.noaa.gov/archive/2020/SALLY_graphics.php).
3. Eric J. Holweg. Mariner's Guide For Hurricane Awareness In The North Atlantic Basin. // Meteorologist Tropical Analysis and Forecast Branch Tropical Prediction Center National Weather Service National Oceanic and Atmospheric Administration. - 2000, - С. 47 -50.
4. Chomski J., Wisniewcki B., Medyna P. Analysis of ship routes avoiding tropical cyclones. // Wyd. AMW, Gdynia. - 2008.
5. Astreina L.B., Pershina L.A., Aderihin I.V., Savel'ev V.G.: Analiz primenimosti Pravila 1-2-3 Mariner's// Ekspluatatsiya morskogo transporta, vypusk № 4 (89). – Novorossiysk: RIO GMU im. adm. F.F.Ushakova. - 2018. - S. 54-61.
6. STORMnews- Rezhim dostupa: <https://stormnews.ru/archives/79801>
7. S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich O sredstvakh blizhnej navigacii dlya avtomatizacii processov provodki i shvartovki sudov v mestah stesnyonного manevrirovaniya [Tekst] / // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2006. № 5. S. 34-36.
8. Boran-Keshish'yan A.L., Astrein V.V., Kondrat'ev S.I. Formalizatsiya obshchej strategii prinyatiya reshenij dlya dostizheniya kompleksnoj bezopasnosti sudna// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 1-2 (43). S. 127-131.
9. Petros'yan A.V. Uluchshenie bezopasnosti moreplavaniya v rajonah dejstviya sistem upravleniya dvizheniem sudov [tekst] / A.V. Petros'yan, E.V. Hekert // Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova. 2016. № 2 (15). S. 22-24.
10. SHorohov V.N. Organizatsiya sbora i rasprirostraneniya gidrometeorologicheskoy informacii [tekst] / V.N. SHorohov, M. YU. Osokin, E. V. Hekert // uchebnoe posobie dlya obucheniya kursantov (studentov) na fakul'tetah voennogo obucheniya (voenno-morskih kafedrah) grazhdanskih vuzov / Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Morskaya gos. akad. im. F. F. Ushakova". Novorossiysk, 2010.

УДК 656.61

DOI: 10.34046/aumsuomt97/8

## ТОЧЕЧНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ЭЛЕКТРОННОЙ НАВИГАЦИИ

*С.А. Ряднов, кандидат технических наук, профессор,  
Н.П. Ардельянов, аспирант  
О.Н. Бубликов, соискатель*

В статье «Точечное оценивание показателей безотказности комплексов электронной навигации» рассмотрены вопросы оценки безотказности компонентов комплексов электронной навигации по статистическим данным, в том числе условия формирования выборок однотипных агрегатов. Предложена методика точечной оценки показателей безотказности по методу фидуциальных вероятностей.

**Ключевые слова:** безотказность, морской транспорт, интервальные оценки, E-навигация, вероятность безотказной работы, комплексы электронной навигации.

## POINT EVALUATION OF RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC NAVIGATION COMPLEXES

*S. Ryadnov, N. Ardelyanov, O. Bublikov*

The article "Point evaluation of reliability indicators of electronic navigation complexes" considers the issue of evaluation of reliability of components of electronic navigation complexes by statistical data, including conditions for formation of representative samples of single-type aggregates.

Method of point estimation of reliability indices by method of fiducial probabilities is proposed.

**Keywords:** reliability, sea transport, interval assessments, E-navigation, probability of failure-free operation, electronic navigation complexes.

Технический прогресс вывел системы управления объектами на принципиально новый уровень. Развитие науки не оставило в стороне и сферу морского транспорта, где исторически находили применение новейшие разработки и достижения человечества. Масштабный кризис экономики 2020 года делает как никогда актуальной политику Международной морской организации (далее – ИМО), направленной на повышение безопасности мореплавания и увеличения эффективности морского транспорта, что невозможно без внедрения современных навигационных инструментов, базирующихся на последних достижениях телекоммуникационных технологий и электронной техники [6].

Реализация концепции Е-навигации, разработанной ИМО в 2006 году, позволит интегрировать новые и существующие навигационные системы, а также будет способствовать преобразованию навигационной информации в цифровой формат. Основопологающей функцией концепции является информационная поддержка принятия решений в области судовождения путем управления морской информацией [7]. Это требует в морской индустрии масштабного формирования цифровой инфраструктуры, позволяющей комплексно обеспечивать безопасность судовождения и управления флотом.

Значительный рост количества управленческих и логистических функций, которые способны решать и выполнять современные комплексы электронной навигации (далее – КЭН), соответствует и увеличению степени сложности данной аппаратуры. Учитывая огромную информационную нагрузку, к комплексам и системам предъявляются повышенные требования по обеспечению их надежности (минимизации ошибок и неисправностей). Это способствует решению задачи их эффективного и продолжительного функционирования.

Из теории надежности известно, что безотказность – свойство устройства или системы сохранять работоспособность в течение требуемого интервала времени. Улучшение показателей безотказности и надежности КЭН возможно путем снижения интенсивности неисправностей и отказов.

При решении задач оценки безотказности основных компонентов комплексов электронной навигации по статистическим данным особое значение приобретает оценка вероятности безотказной работы (далее – ВБР). В случае использования биномиальной схемы испытаний, при которой продолжительности независимых испытаний совпадают, результаты фиксируются в виде «успех-отказ». Если  $\alpha_i$  – число отказавших

из контролируемых в ходе осмотров КЭН, то точечная оценка ВБР изделия и её дисперсия определяется выражением

$$P_i^* = \frac{(n_i - \alpha_i)}{n_i}, \quad (1)$$

$$D_i = \frac{P_i^*(1 - P_i^*)}{n_i}. \quad (2)$$

Здесь  $P_i^*$  – оценка максимального правдоподобия (далее – ОМП) ВБР. Она является состоятельной и эффективной [1].

Минимальная оценка ВБР, полученная Ходжесом и Леманом [2], имеет вид

$$\tilde{P}_i = \frac{n_i - \alpha_i + \sqrt{n_i/2}}{n_i + \sqrt{n_i}}. \quad (3)$$

Оценка  $\tilde{P}$  является минимаксной по критерию среднего квадрата ошибки. Дисперсия оценки (3) равна  $\frac{n_i}{4(n_i + \sqrt{n_i})^2}$  и не зависит от  $P$  в отличие от дисперсии оценки (1).

Следовательно оценка  $\tilde{P}$  лучше  $P^*$  для тех  $P$ , для которых выполняется условие

$$\frac{n_i}{4(n_i + \sqrt{n_i})^2} \leq \frac{p_i(1 - p_i)}{n_i},$$

т. е. для  $p \in \left[\frac{1}{2} \pm a\right]$ , где  $a = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + 1/\sqrt{n})^2}}$ .

Для обеспечения стабильности дисперсии к оценке (1) часто применяют преобразование арксинуса [3]. В этом случае дисперсия оценки

$$\hat{P}_1 = 2 \arcsin \sqrt{P^*} \quad (4)$$

также не зависит от  $P$  и равна  $\frac{1}{n}$ .

Иногда используется другой вариант оценки (5)

$$\hat{P}_2 = 2\sqrt{n} \arcsin \sqrt{P^*}. \quad (5)$$

В этом случае дисперсия равна единице. Приведенные преобразования хорошо «работают» на всем интервале изменения переменной  $P_n$  за исключением краев интервала возможных значений. Преобразование

$$\hat{P}_3 = \arcsin \sqrt{\frac{m+3/8}{n+3/4}}, \quad m = n - d, \quad (6)$$

удовлетворительно на всем отрезке изменения  $\hat{P}$ , причем оно имеет более стабильную дисперсию, асимптотически равную  $\frac{1}{4n+2}$ . Кроме обеспечения стабильности дисперсии преобразование арксинуса дает также распределение, которое ближе к нормальному, чем исходное.

В случае отсутствия отказов ОМП ВБР  $P^* = 1$ , однако, при небольших объемах эксплуатируемых КЭН ее применение не всегда целесообразно. В этих условиях точечная оценка ВБР может быть приведена по методу фидуциальных вероятностей [4].

Рассмотрим существо этой методики. Пусть  $q_i$  – неизвестная вероятность отказа агрегата КЭН  $i$ -го типа, где  $i = 1, 2, \dots, l$ . Здесь и далее под агрегатом КЭН будем понимать любой конструкционный элемент, который в ходе эксплуатации не ремонтируется и в случае отказа заменяется новым. Предположим, что по результатам проверок  $n_i$  одинаковых агрегатов отказов не обнаружилось. Тогда значение функции распределения результатов проверок агрегата КЭН при фиксированной вероятности отказа  $q_i$  будет иметь вид

$$F_i(q_i, n_i) = 1 - (1 - q_i)^{n_i}. \quad (7)$$

Рассмотрим условия формирования выборок однотипных агрегатов. Эти агрегаты могут быть выпущены разными заводами или одним заводом, но в различные интервалы времени, до и после модернизации конструкции, технологии и т.д., что может привести к формированию выборок с различными уровнями надежности. Поэтому естественно предположить, что вероятность отказа агрегата может иметь функцию распределения.

Нетрудно установить, что функция  $F_i(q_i, n_i)$ , определяемая соотношением (7), обладает всеми формальными свойствами функции распределения вероятности отказа  $q_i$  агрегата – она монотонно возрастает по  $q_i$ ,  $F_i(0, n_i) = 0$ ,  $F_i(1, n_i) = 1$ .

Указанное распределение вероятности отказа  $q_i$ , отвечающее данному значению результатов безотказных проверок, называется фидуциальным. Тогда математическое ожидание вероятности отказа агрегата можно определить как

$$M_\Phi[q_i] = \int_0^1 q_i dF_i = \int_0^1 q_i n_i (1 - q_i)^{n_i-1} dq_i, \quad (8)$$

$$M_\Phi[q_i] = \frac{1}{n_i + 1}. \quad (9)$$

После несложных преобразований фидуциальная дисперсия оценки вероятности отказа агрегата  $q_i^* = M_\Phi[q_i]$  может быть получена в виде соотношения

$$D_\Phi[q_i^*] = n_i / [(n_i + 1)^2 (n_i + 2)]. \quad (10)$$

Тогда точечная оценка ВБР агрегата, получаемая по методу фидуциальных вероятностей при безотказных испытаниях, будет определяться как

$$P_4^* = 1 - q_i^* = n_i / (n_i + 1). \quad (11)$$

Ясно, что оценка (11) является нижней границей точечной оценки ВБР по результатам безотказных испытаний. При отсутствии априорной информации о надежности агрегата или изделия в целом и, следовательно, при невозможности отдать предпочтение либо оценке (11), либо ОМП, обычно выбирается их линейная комбинация в

предположение равно вероятности этих граничных оценок

$$P_5^* = 1 - \frac{2n+1}{2n+2}, \quad (12)$$

$$D(P_5^*) = \frac{n}{4(n+1)^2(n+2)}. \quad (13)$$

Если же имеется априорная информация о надежности КЭН, например, задание в виде определенного числа значения показателя безотказности, то целесообразно использовать байесовские оценки ВБР [5]. Сущность способов получения апостериорных байесовских оценок заключается в использовании таких априорных распределений, которые максимизируют функцию апостериорного байесовского риска, т.е. в качестве априорного распределения выбирается наилучшее распределение, для которого выполняются заданные ограничения. Если известно априорное значение вероятности безотказной работы  $P_0$ , то для биномиальной схемы испытаний расчет оценки этого показателя безотказности производится по формулам

$$\hat{P}_B = \frac{\alpha + n - d}{\alpha + \beta + n}, \quad (14)$$

$$D(\hat{P}_B) = \frac{(a+n-d)(\beta+d)}{(a+\beta+n)^2(a+\beta+n+1)}. \quad (15)$$

Значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  определяются с помощью следующей процедуры. Эти параметры равны нулю, если выполняются условия

$$\begin{cases} \frac{1-P_0}{P_0} \leq q, & \text{если } d < \frac{n}{2} \\ \frac{1-P_0}{P_0} \geq q, & \text{если } d \geq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (16)$$

$$q = \frac{[(d+1)(n-2d) + 2(n-d)^2]}{(n-d)[(n-d+1)(n-2d) - 2d^2]}$$

В случае невыполнения условий (16) параметры  $\alpha$  и  $\beta$  находятся из соотношений

$$\alpha = (x_* - n) P_0, \quad (17)$$

$$\beta = (x_* - n) (1 - P_0), \quad (18)$$

где  $x_*$  – корень кубического уравнения

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0. \quad (19)$$

В соотношении (19) коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  находятся как

$$a = -\frac{2s(2P_0-1)}{P_0(1-P_0)}, \quad b = -\frac{s(3s+2P_0-1)}{P_0(1-P_0)},$$

$$c = -\frac{2s^2}{P_0(1-P_0)}, \quad s = n(1-P_0) - d.$$

Уравнение (19) имеет единственный корень  $x^*$  в области  $x > n$ .

Как известно, по статистическим данным восстановить точно значение показателя безотказности невозможно. Поэтому при использовании точечной оценки вероятности безотказной работы необходимо знать пределы и вероятности возможной ошибки. Другими словами, должны быть известны точность и достоверность используемой точечной оценки. Точность статистической

оценки принято характеризовать шириной интервала, внутри которого с некоторой вероятностью находится истинное значение искомой числовой характеристики, достоверность – величиной вероятности. Оценки такого вида называются интервальными оценками.

#### Литература

1. Острейковский, В.А. Теория надежности.– М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
2. Леманн, Э. Теория точечного оценивания.– М.: Наука, 1991. – 448 с.
3. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике.– М.: АСТ, Астрель, 2006. – 991 с.
4. Барзилович, Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем.– М.: Высшая школа, 1982. – 232 с.
5. Острейковский, В. А. Математические методы теории надежности :конспект лекций по курсу «Прикладная теория надежности». Ч. 1. –Обнинск: ИАТЭ, 1988. – 84 с.
6. Patraiko D. 5e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – CRC Press, 2009. – Pp. 55–60.
7. Вагущенко Л. Л. Современные информационные технологии в судовождении / Л. Л. Вагущенко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 135 с.

#### Reference

1. Ostrejkovskij, V.A. Teoriya nadezhnosti.– М.: Vysshaya shkola, 2003. – 463 s.
2. Lemann, E. Teoriya tochechnogo ocenivaniya.– М.: Nauka, 1991. – 448 s.
3. Vygodskij, M. YA. Spravochnik po vysshej matematike.– М.: AST, Astrel', 2006. – 991 s.
4. Barzilovich, E. YU. Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnyh system.– М.: Vysshaya shkola, 1982. – 232 s.
5. Ostrejkovskij, V. A. Matematicheskie metody teorii nadezhnosti: konspekt lekcij po kursu «Prikladnaya teoriya nadezhnosti». CH. 1. – Obninsk: IATE, 1988. – 84 s.
6. Patraiko D. 5e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – CRC Press, 2009. – Pp. 55–60.
7. Vagushchenko L. L. Sovremennye informacionnye tekhnologii v sudovozhdenii / L. L. Vagushchenko. – Odessa: ONMA, 2013. – 135 s.