

УДК 623.762.004

**О.В. ИВАНЧЕНКО, А.В. КАРЯКА, С.А. МАВРИН, И.Л. ФИЛИМОНОВ***Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова, Украина***ОЦЕНКА УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО  
ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ**

Представлены опорная и оценочная модели надежности телекоммуникационных систем морских подвижных объектов. Получены соотношения для расчета значений нестационарного коэффициента готовности, которые предлагается использовать для обоснованного прогноза моментов начала проведения технического обслуживания телекоммуникационных систем морских подвижных объектов по состоянию.

**надежность телекоммуникационных систем, нестационарный коэффициент готовности****Введение**

**Постановка проблемы.** На протяжении всей истории своего развития человечество стремилось изучить и освоить Мировой океан, используя для достижения этой цели суда, корабли различных классов и назначения, которые условно с точки зрения обеспечения связи с ними; эффективного функционирования судовых и наземных телекоммуникационных систем (ТКС) называют морскими подвижными объектами (МПО).

Современные тенденции в развитии МПО, степень важности решаемых ими в различных районах Мирового океана задач предъявляют повышенные требования к их ТКС. И связано это не только с обеспечением оперативного управления МПО, но и с необходимостью сохранения человеческой жизни на море. Поэтому одним из важнейших требований, предъявляемых к ТКС морских подвижных объектов, является обеспечение их надежности и живучести.

Основу ТКС МПО, на которые возлагается решение указанных задач, составляет радиооборудование Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания (ГМССБ) [1,2], работающее в диапазонах про-

межуточных (ПВ), коротких (КВ) и ультракоротких (УКВ) волн. Причем, это оборудование выполняется как в виде судовых, так и береговых земных станций.

Известно [2], что работоспособность (РС) судового радиооборудования ГМССБ должна обеспечиваться с помощью следующих способов:

- дублирование оборудования;
- береговое техническое обслуживание и ремонт;
- квалифицированное техническое обслуживание (ТО) и ремонт в море.

Немаловажную роль в организации и обеспечении ТО радиооборудования ГМССБ играет фактор «одобрения и признания» Администрацией судовладельца. Безусловно учет этого фактора, выступающего как реальная субъективная оценка, не позволяет гарантированно точно оценивать уровень надежности изделия. И как следствие, моменты времени и объем проводимых операций ТО устанавливается неверно, что приводит к неоправданно высоким материально-техническим затратам.

Таким образом, актуальной является задача совершенствования научно-методического аппарата определения моментов проведения ТО за счет технико-экономической оптимизации процедуры оцен-

ки уровня надежности телекоммуникационных систем МПО.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Частично методики, основанные на использовании экономических показателей, рассмотрены в работах [3,4,5] для определения оптимального интервала ТО. В частности, как один из вариантов, рассматривалась стратегия минимальных восстановлений с периодическими полными восстановлениями. Предполагается, что при проведении углубленного ТО (ТО большой периодичности) выполняются полные восстановления (ПНВ), а на интервале между ТО – минимальные восстановления (МНВ).

Для рассмотренной в [4] стратегии МНВ с периодическими ПНВ оптимальный интервал ТО  $\tau$  определялся как результат решения уравнения

$$\tau\lambda(\tau) - \Lambda(\tau) = c_v/c_m,$$

где  $\Lambda(\tau) = \int_0^{\tau} \lambda(x)dx$  – среднее число МНВ на интервале  $(0, \tau)$ ;  $\lambda(\tau)$  – интенсивность отказов при МНВ;  $c_v$  – затраты на ПНВ;  $c_m$  – затраты на МНВ.

Несомненно к достоинствам данной методики можно отнести относительную простоту определения величины  $\tau$ ; к недостаткам – отсутствие учета стоимости изделия, суммарных затрат на использование изделия по назначению, удельных затрат на ТО и устранение отказов, низкая точность оценки фактического уровня надежности радиоаппаратуры.

**Цель статьи.** Целью предлагаемой статьи является представление опорной модели и построение на ее основе оценочной модели надежности изделий, используемых для обоснованного прогноза моментов начала проведения технического обслуживания ТКС морских подвижных объектов по состоянию. Исследования проводились для случая ограниченного и неограниченного числа полных восстановлений РС радиооборудования ПВ, КВ,

УКВ – диапазонов телекоммуникационных систем МПО.

### Изложение основного материала

Согласно подходу, изложенного в [6], основу опорной модели надежности ТКС МПО составляют расчетные соотношения для нестационарного коэффициента готовности (КГ). В частности, при организации связи с МПО по радионаправлению можно использовать соотношение

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^m K_{\Gamma_i}, \quad (1)$$

где  $m$  – число средств связи (СрС), образующих радионаправление;  $K_{\Gamma_i}$  – нестационарный КГ  $i$ -го СрС.

Значения  $K_{\Gamma_i}$  в (1) определяются согласно [7] с учетом технических состояний, в которых может находиться СрС на момент начала его эксплуатации, когда  $t = 0$ .

В качестве оценочной модели используются выражения для расчета нестационарного КГ в предположении, что выполняется неограниченное число ПНВ, а продолжительность непрерывной работы радиооборудования ТКС МПО является случайной величиной. Под полным восстановлением будем подразумевать событие, заключающееся в таком восстановлении РС изделия после его отказа, когда изделие функционирует как новое с неизменным запасом ресурса.

Обоснуем продолжительность работы ТКС МПО на примере радиооборудования ГМССБ.

В мире известно достаточно большое количество фирм, выпускающих отдельные комплекты оборудования ГМССБ. И только фирмы FURUNO, SAILOR, SCANTI производят полные комплексы оборудования ГМССБ. Наиболее широкое распространение получила продукция фирмы SAILOR, радиооборудование которой является оптимальным с учетом соотношения цены и качества функциони-

рования аппаратуры. Об успехах этой фирмы свидетельствует следующий факт: большинство компьютерных тренажеров ГМССБ, выпускаемых различными фирмами, имитируют оборудование фирмы SAILOR.

Результаты анализа продолжительности функционирования оборудования свидетельствуют, что УКВ радиостанции цифрового избирательного вызова (ЦИВ) работают непрерывно в течение суток; аналогично функционируют ПВ/КВ ЦИВ установки. Что касается спутниковой связи, то, как правило, данные станции выключаются лишь тогда, когда судно заходит в порт назначения.

На рис. 1 представлен внешний вид наиболее широко используемой УКВ ЦИВ радиостанции фирмы SAILOR RT4822.



Рис. 1. Внешний вид панели УКВ ЦИВ радиостанции RT4822.

С учетом изложенного будем полагать, что для ТКС МПО выполняется неравенство  $T_0 \gg T_B$  ( $T_0$  – среднее время наработки на отказ,  $T_B$  – среднее время восстановления). В этой ситуации для расчета нестационарного КГ с приемлемой для данной задачи точностью можно считать законы распределения времени восстановления РС и наработки между отказами экспоненциальными с параметрами  $\mu = 1/T_B$  и  $\lambda = 1/T_0$ , соответственно. Сохраним предположение о независимости интервалов безотказной работы и восстановления, а также о том, что на интервалах восстановления отказы не возникают. Кроме того, будем рассматривать наблюдаемый поток восстановлений работоспособного состояния ТКС как

простой поток восстановлений. Тогда для случая, когда продолжительность интервала эксплуатации  $t$  – детерминированная величина, нестационарный КГ определяется из выражения

$$K_T(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (2)$$

В общем случае продолжительность пребывания ТКС во включенном состоянии следует рассматривать как случайную величину, распределенную по определенному закону. Тип и параметры этого закона определяются особенностями района плавания (климатические, метеорологические), реализуемыми дальностями связи и т.д. Поэтому для случая, когда  $t$  – случайная величина, распределенная с плотностью  $\varphi(t)$  в интервале  $t \in [c, d]$ , то выражение для нестационарного КГ можно записать в виде:

$$K_T(\varphi(t)) = \int_c^d K_T(t) \varphi(t) dt. \quad (3)$$

Тогда с учетом сформулированных допущений имеют место следующие расчетные соотношения, соответствующие определенным ситуациям использования по назначению ТКС МПО:

1) продолжительность интервала эксплуатации – случайная величина, распределенная по равномерному закону с параметрами  $t \in (c, d)$ ,  $c = 0$ :

$$K_T(\varphi(t)) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{d(\mu + \lambda)^2} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \mu)d}), \quad (4)$$

где  $d$  – максимальная продолжительность интервала эксплуатации;

2) продолжительность интервала эксплуатации – случайная величина, распределенная по усеченному нормальному закону с известными параметрами  $m(t)$ ,  $\sigma(t)$ :

$$K_T(\varphi(t)) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda c_1 c_2}{\mu + \lambda} \times \exp \left[ -(\lambda + \mu)m(t) + \frac{(\lambda + \mu)^2 \sigma^2(t)}{2} \right], \quad (5)$$

$$\text{где } c_1 = \left[ \Phi \left( \frac{d - m(t)}{\sigma(t)} \right) - \Phi \left( \frac{c - m(t)}{\sigma(t)} \right) \right]^{-1},$$

$$c_2 = \Phi \left( \frac{d - m(t) + (\lambda + \mu)\sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right) -$$

$$- \Phi \left( \frac{c - m(t) + (\lambda + \mu)\sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right).$$

Выполним оценку влияния функций распределения случайной величины  $t$ , их параметров на величину нестационарного КГ. С этой целью определим величину

$$\Delta K_r(t) = |K_r(t) - K_r(\varphi(t))|,$$

где  $K_r(t)$  – значение нестационарного КГ, определяемое с помощью соотношения (2).

Для оценки влияния функций распределения случайной величины  $t$ , ее параметров будем полагать м.ож. случайных величин равными соответствующим детерминированным значениям. В результате получим:

- для равномерного распределения случайной величины  $t$ :

$$\Delta K_r(t) = \left| \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left[ e^{-(\lambda + \mu)t} - \frac{1}{2(\lambda + \mu)t} (1 - e^{-2(\lambda + \mu)t}) \right] \right|, \quad (6)$$

где  $m(t) = d / 2 = t$ ;

- для случайной величины  $t$ , распределенной по усеченному нормальному закону:

$$\Delta K_r(t) = \left| \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \times \left[ 1 - c_1 c_2 \exp \left\{ \frac{(\lambda + \mu)^2}{2} \sigma^2(t) \right\} \right] \right|. \quad (7)$$

Опыт использования ТКС МПО по назначению свидетельствует, как правило, на интервале эксплуатации можно выполнить лишь ограниченное число восстановлений. Получим выражения для расчета нестационарного КГ в предположении, что выполняется ограниченное число ПНВ телекоммуникационных систем МПО.

При ограниченном числе ПНВ формулу для нестационарного КГ можно записать следующим образом:

$$K_r(t) = \sum_{i=0}^n P(A_i), \quad (8)$$

где  $P(A_i)$  – вероятность того, что на интервале ожидания до момента  $t$  произошло ровно  $i$  восстановлений и в момент  $t$  ТКС работоспособна;  $n$  – число восстановлений.

Вероятность  $P(A_i)$  определим по формуле [4]

$$P(A_i) = \int_0^t \bar{F}(t-u) f_i(u) du; \quad i = \overline{1, n};$$

$$P(A_0) = \bar{F}(t), \quad (9)$$

где  $f_i(u)$  – плотность распределения альтернирующего процесса восстановлений (отказов).

При стохастическом подходе для случая, когда  $t$  – случайная величина с плотностью распределения  $\varphi(t)$  в интервале  $t \in [c, d]$ ,  $c = 0$ , то выражение для нестационарного КГ можно записать следующим образом:

$$K_r(\varphi(t)) = \int_0^d \sum_{i=0}^n P(A_i) \varphi(t) dt. \quad (10)$$

В соотношениях (8), ..., (10) вычисление вероятности  $P(A_i)$  сводится к вычислению интегралов свертки плотностей распределения. Для вычисления интегралов свертки используется известный метод характеристических функций [4].

Тогда при детерминистском подходе для случая одного отказа и одного восстановления в соответствии с (8), (9) получим

$$P(A_0) = e^{-\lambda_1 t},$$

$$P(A_1) = \frac{\mu(1 - e^{-\lambda_1 t})}{\lambda_1 - \mu} \left[ e^{-\mu t} - e^{-\lambda_1 t} \right],$$

$$K_r(t) = \sum_{i=0}^1 P(A_i) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\mu}{\lambda_1 - \mu} \left[ 1 - e^{-\lambda_1 t} \right] \cdot \left[ e^{-\mu t} - e^{-\lambda_1 t} \right]. \quad (11)$$

В свою очередь при стохастическом подходе с учетом сформулированных допущений и соотношения (11) имеют место следующие расчетные соотношения:

1) продолжительность интервала эксплуатации – случайная величина, распределенная по равномерному закону с параметрами  $t \in (c, d)$ ,  $c = 0$ :

$$K_r(\varphi(t)) = \frac{1}{d} \left[ \frac{\mu e^{-\lambda d} - \mu}{2\lambda(\lambda - \mu)} + \frac{\mu e^{-(\lambda + \mu)d} - \mu}{\lambda^2 - \mu^2} - \frac{1}{\lambda - \mu} (e^{-\mu d} - 1) - \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda d} - 1) \right]. \quad (12)$$

2) продолжительность интервала эксплуатации – случайная величина, распределенная по усеченному нормальному закону с известными параметрами  $m(t)$ ,  $\sigma(t)$ :

$$K_r(\varphi(t)) = c_1 \left[ \frac{(\lambda - 2\mu)c_2}{\lambda - \mu} e^{-\lambda m(t) + \frac{\lambda^2 \sigma^2(t)}{2}} + c_3 e^{-\mu m(t) + \frac{\mu^2 \sigma^2(t)}{2}} - \frac{\mu}{\lambda - \mu} \left( -c_4 e^{-(\lambda + \mu)m(t) + \frac{(\lambda + \mu)^2 \sigma^2(t)}{2}} + c_5 e^{-2\lambda m(t) + \frac{(2\lambda)^2 \sigma^2(t)}{2}} \right) \right], \quad (13)$$

$$c_1 = \left[ \Phi \left( \frac{d - m(t)}{\sigma(t)} \right) - \Phi \left( \frac{c - m(t)}{\sigma(t)} \right) \right]^{-1},$$

$$c_2 = \Phi \left( \frac{d - m(t) + \lambda \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right) - \Phi \left( \frac{c - m(t) + \lambda \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right),$$

$$c_3 = \Phi \left( \frac{d - m(t) + \mu \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right) - \Phi \left( \frac{c - m(t) + \mu \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right),$$

$$c_4 = \Phi \left( \frac{d - m(t) + (\lambda + \mu) \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right) - \Phi \left( \frac{c - m(t) + (\lambda + \mu) \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right),$$

$$c_5 = \Phi \left( \frac{d - m(t) + 2\lambda \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right) - \Phi \left( \frac{c - m(t) + 2\lambda \sigma^2(t)}{\sigma(t)} \right).$$

Ниже на рис. 2, 3 приведены результаты расчетов зависимости  $\Delta K_r(t)$  для различных функций распределения случайной величины  $t$  и их параметров при неограниченном числе ПНВ.

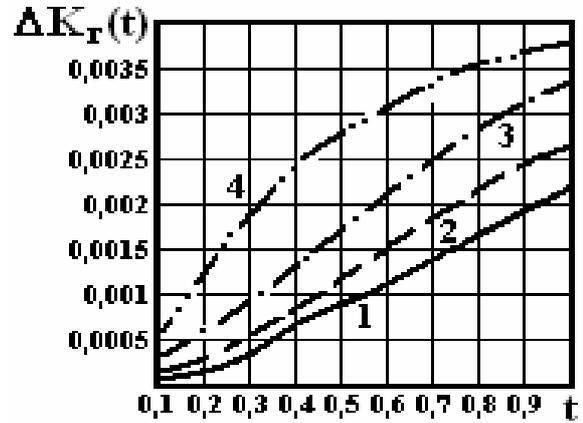


Рис. 2. Зависимость  $\Delta K_r(t)$  для равномерного закона распределения продолжительности эксплуатации ТКС: 1 –  $T_0 = 30$ ч,  $T_B = 1$ ч; 2 –  $T_0 = 24$ ч,  $T_B = 0,8$ ч; 3 –  $T_0 = 18$ ч,  $T_B = 0,6$ ч; 4 –  $T_0 = 12$ ч,  $T_B = 0,4$ ч.

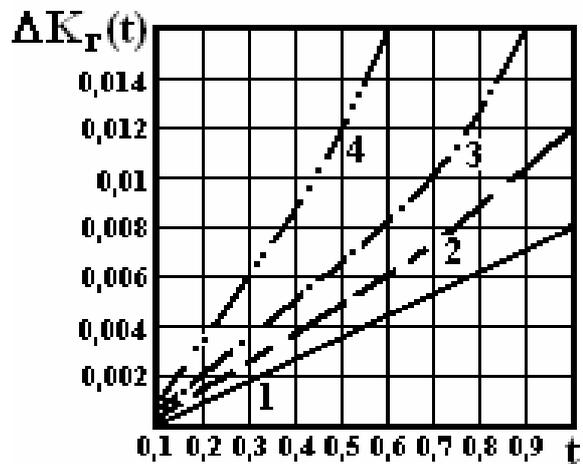


Рис. 3. Зависимость  $\Delta K_r(t)$  для нормального закона распределения продолжительности эксплуатации ТКС: 1 –  $T_0 = 30$ ч,  $T_B = 1$ ч; 2 –  $T_0 = 24$ ч,  $T_B = 0,8$ ч; 3 –  $T_0 = 18$ ч,  $T_B = 0,6$ ч; 4 –  $T_0 = 12$ ч,  $T_B = 0,4$ ч.

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Из полученных графиков зависимостей  $\Delta K_r(t)$  (рис. 2, 3) видно, что величина нестационарного коэффициента готовности для равномерного закона распределения и усеченного нормального закона распределения с коэффициентом вариации  $\vartheta(t) = 1$  продолжительности интервала эксплуатации ТКС  $t$  больше нестационарного коэффициента готовности при детерминированном  $t$  на аналогичном интервале эксплуатации, т.е. выполняется неравенство  $K_r(\varphi(t)) > K_r(t)$ . Следовательно, если рассматривать  $t$  как случайную величину с плотностью распределения  $\varphi(t)$ , то становится ясно, что при детерминистском подходе надежность ТКС оказывается заниженной. В этом случае к эксплуатации ТКС предъявляются более жесткие требования, т.е. ТКС, на которой уровень безотказности соответствует требованиям, подвергается техническому обслуживанию. Это обстоятельство приводит к неоправданному росту экономических затрат на выполнение мероприятий ТО.

В перспективе разработанные модели могут быть использованы для задания требований к предельным значениям показателей безотказности ТКС МПО для случаев ограниченного и неограниченного числа их полных восстановлений с учетом случайного характера изменений продолжительности интервалов эксплуатации. Использование расчетных соотношений для нестационарного КГ применительно к изделиям, обслуживаемым по состоянию, позволит задавать предельные значения их показателей безотказности с большей точностью, чем для изделий, которые обслуживаются по регламентированным стратегиям при береговом и квалифицированном техническом обслуживании.

### Литература

1. Шишкин А.В., Купровский В.И., Кошевой В.М. Глобальная морская система связи для безопасности мореплавания. – 2-е изд. перераб. и доп. – Одесса: Одесская Государственная Морская Академия, 1998. – 188 с.
2. Лукьянчук А.Г. Работа в Глобальной морской системе связи: Учебное пособие/ А.Г. Лукьянчук, А.В. Мельников. – Севастополь: СевНТУ, 2003. – 170 с.
3. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
4. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
5. Герасимова Е.Д. Методическое обеспечение технического обслуживания функциональной системы самолета по состоянию со статистическим регулированием уровня надежности // Научные основы построения и реализации программ технического обслуживания и ремонта летательных аппаратов / МИИГА – М., 1981. – С. 65-70.
6. Соловьев В.И., Новик Л.И., Морозов И.Д. Связь на море. – Л.: Судостроение, 1978. – 320 с.
7. Иванченко О.В., Маврин С.А., Грушевой И.В. Комплексный подход к обеспечению требований живучести телекоммуникационных систем морских подвижных объектов. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – Вип. 8. – С. 193-195.

*Поступила в редакцию 12.02.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д.А. Кучер, Севастопольский ордена красной звезды военно-морской институт им. П.С. Нахимова, Севастополь.