

СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 656.61.052:621.396.967

И. В. Адерихин, М. Г. Воротынцева, Л. В. Цветкова

МЕТОД И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ СУДОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Рассматривается использование метода пространства состояний как наиболее адекватного для оценивания готовности судовых радиотехнических средств к применению. Для реализации метода составляется модель функционирования судовой радиолокационной станции (СРЛС) в виде размеченного графа состояний и переходов, выбираются подмножества состояний, суммарная вероятность пребывания в которых позволяет найти показатель готовности СРЛС к применению (или вероятность ее любого состояния). Представляя функционирование станции в виде марковского процесса, для нахождения аналитического выражения показателя режима готовности в соответствии с графом состояний и переходов записывается инфинитезимальная матрица и система алгебраических уравнений для вероятностей нахождения станции в любом из состояний. В результате решения уравнений системы получены выражения для показателя режима готовности и вероятности пребывания СРЛС в любом состоянии. Рассмотренный метод позволяет проводить оценку влияния параметров функционирования СРЛС на их готовность и определять, за счет изменения каких управляемых параметров, на каких направлениях и на какую величину можно достигнуть увеличения показателя режима готовности до заданного уровня в тех или иных условиях.

Ключевые слова: судовые радиотехнические средства, методика, математические модели оценивания готовности, готовность к применению, показатели, динамика функционирования, режимы и условия применения.

Введение

Постановка задачи. Обеспечение безопасности морского и речного судоходства является главным условием эффективного функционирования водного транспорта. Решение этой проблемы в настоящее время немыслимо без широкого применения технических средств судовождения, и прежде всего радиотехнических средств навигации и локации, контроля и информационного обмена, а также космических систем связи и навигации, определения местоположения судов, терпящих бедствие, и гидрометеорологического обеспечения [1, 2].

Значение радиотехнических средств в обеспечении безопасности морского и речного судоходства особенно возрастает в условиях высокой интеграции мирового рынка, увеличения тоннажа, скорости и интенсивности движения судов, а также сокращения численности экипажей на судах, т. к. процесс судовождения становится все более сложным, динамичным и проблема обеспечения безопасности морского и речного судоходства приобретает приоритетное значение. Широкое использование судовых радионавигационных и радиолокационных средств позволяет обеспечивать безопасность судоходства при пониженной или ограниченной видимости, определять место судна по известным космическим, береговым или плавучим ориентирам, облегчает проведение швартовых операций, особенно крупнотоннажных судов, и создает необходимые условия для решения задач автоматизации процессов судовождения [1, 2].

Все это требует дальнейшего совершенствования современных судовых радиотехнических средств (РТС) и создания новых, а также разработки методов и математических моделей оценивания показателей их эксплуатационных свойств и обоснований требований к ним, а также способов их обеспечения. Опыт эксплуатации судовых РТС показывает, что уже недостаточно оценивать и поддерживать только их надежность – необходимо учитывать условия, динамику функционирования и особенности применения судовых РТС при обеспечении безопасности морского и речного судоходства. Это означает, что возникает необходимость в рассмотрении нового интегративного свойства судовых РТС – их готовности к применению, которая в настоящее время в научно-технической литературе рассматривается лишь на вербальном уровне.

Действительно, какими бы высокими не были эксплуатационно-технические параметры судовых РТС, эффективность их применения может быть сведена к нулю, если они не будут иметь достаточной готовности к применению. Недостаточная готовность судовых РТС не только резко снижает эффективность их применения, но и приводит к возникновению аварийных ситуаций и огромным экономическим потерям. Вот почему обеспечение высокого уровня готовности судовых РТС (СРТС) является одной из важнейших задач для лиц, занимающихся решением проблемы безопасности мореплавания и разработкой и применением СРТС.

В дальнейшем под готовностью понимается свойство СРТС, характеризующее их приспособленность к переводу из любого состояния в состояние непосредственного применения по назначению. На практике наиболее часто в качестве показателей готовности используют комплексные показатели надежности (коэффициент готовности K_r и простоя K_n), определяемые следующими выражениями:

$$\begin{aligned} K_r &= T_0(T_0 + T_b)^{-1} = \mu(\lambda + \mu)^{-1}, \\ K_n &= T_0(T_0 + T_b)^{-1} = \mu(\lambda + \mu)^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_0 – наработка на отказ ($\lambda = 1/T_0$ – интенсивность отказа); T_b – среднее время восстановления ($\mu = 1/T_b$ – интенсивность восстановления).

Однако эти показатели базируются на дихотомическом подходе и справедливы только для систем, находящихся поочередно только в двух состояниях: рабочем (выполнение целевой задачи) и неисправном (восстановление работоспособности). В то же время судовые РТС (средства радиолокации и радионавигации) имеют более сложные схемы функционирования и значительное число состояний (режимов): режим ожидания, подготовки судоводителя и аппаратуры, восстановления работоспособности, технического обслуживания, выполнения целевых задач, и применяются в более сложных условиях (воздействия помех) и др. Именно поэтому при исследовании готовности СРТС необходимо выбрать такой показатель, который учитывал бы временные параметры указанных выше режимов, условия применения и динамику функционирования СРТС.

Все это требует нового подхода как к трактовке, так и к оцениванию готовности СРТС к применению. Рассмотрим один из возможных методов (подходов) определения (оценивания) показателя готовности СРТС, иллюстрируемой на примере нерезервируемой судовой РЛС, с учетом динамики функционирования и условий применения, когда моменты поступления и продолжительности решения каждой задачи, а также время пребывания в состояниях являются случайными.

Метод решения задачи и результаты исследования

Анализ методов оценивания показателей интегративных свойств сложных систем [3, 4], условий применения и особенностей функционирования СРТС [1, 2] позволил заключить, что для оценивания показателей готовности СРТС наиболее адекватным является метод пространства состояний, основу которого составляют следующие положения.

1. Выявление возможных признаков описания состояний (режимов) СРТС на основании анализа вербальных моделей их функционирования. К признакам состояния могут относиться: число неготовых подсистем (отказавшие элементы, блоки); уровень пропускной способности (производительность); вид мероприятий (число операций), проводимых на СРТС; характер про-

водимых мероприятий (режимов) на СРТС и др. По результатам анализа особенностей, режимов и условий применения, а также выбранных признаков определения возможных состояний выделяются все основные состояния, в которых может находиться судовая РТС, составляющие полную группу несовместных событий, т. е. $\sum_{i=1}^S P_i = 1$, где P_i – вероятность нахождения СРТС в i -м из состояний; S – число состояний.

2. Составление размеченного графа состояний (переходов) $G(P, B)$, под которым понимают графическое представление состояний (режимов) СРТС (или пространство состояний процесса) и возможных переходов между состояниями, где P – множество вершин графа, представляющее вектор вероятностей P_i , а B – множество ветвей графа, оператором которых являются интенсивности переходов СРТС из i -го в j -е состояние (λ, ij) . Вершины графа можно разделить на вершины, соответствующие состояниям, в которых СРТС полностью или частично готовы к применению; полностью или частично не готовы к применению; состояниям проведения соответствующих мероприятий на СРТС и т. д.

3. Построение инфинитезимальной матрицы и систем алгебраических уравнений по размеченному графу состояний и их решение. Для этого необходимо:

а) пронумеровать строки и столбцы по числу состояний, выделенных при построении размеченного графа состояний;

б) заполнить диагональные элементы матрицы (слева направо), под которыми понимается сумма всех интенсивностей переходов, выходящих из рассмотренного состояния, взятых со знаком «-»; т. е. $\sum \lambda_{ij} = -A_i$;

в) заполнить остальные элементы матрицы по столбцам, которые представляют интенсивности перехода из состояния, определяемого номером строки со знаком «+»;

г) проверить, после заполнения матрицы, правильность внесения элементов матрицы, для чего в каждом столбце проверяется сумма интенсивностей, т. е.

$$A_i = \sum \lambda_{ij} = 0;$$

д) составить с использованием полученной матрицы систему алгебраических уравнений и решить ее. Индекс вероятности состояния, стоящий в левой части уравнения, определяется номером строки. В правой части – сумма вероятностей по строке, индекс которых определяется номером столбца (умножаются на коэффициенты, являющиеся элементами матрицы, которые берутся со своими значениями из матрицы на пересечении рассматриваемой строки и столбца). Полученную систему уравнений дополняют начальным условием (условие нормировки $\sum_{i=1}^S P_i = 1$).

4. Выбор подмножества интересующих нас состояний S_i , суммарная вероятность пребывания в которых позволяет найти искомым показатель готовности P_r СРТС (или вероятность любого состояния). К таким состояниям, в зависимости от решаемой задачи, могут относиться, например, пребывание в режиме готовности СРТС к применению, к проведению тех или иных эксплуатационных мероприятий и др.

$$P_r = \sum_{i \in S_i} P_i,$$

где $S_i \in S$.

5. Анализ полученного выражения для показателя готовности, оценки влияния отдельных групп интенсивностей λ_{ij} на показатель готовности P_r . Разработка рекомендаций по обеспечению требуемого значения показателя P_r и выбор управляемых параметров (λ_{ij}) системы обеспечения готовности СРТС на различных этапах жизненного цикла (разработка, производство, эксплуатация).

С целью иллюстрации метода и получения аналитических зависимостей для показателя готовности, например, судовой радиолокационной системы (СРЛС) «НАЯДА-25», на основании результатов анализа особенностей, режимов и условий применения, обобщенную модель функционирования СРЛС можно представить в виде размеченного графа состояний и переходов (рис. 1).

В соответствии с основными положениями метода пространства состояний [3–6] и анализа обобщенной модели функционирования возьмем в качестве признака состояний характер мероприятий (режимов), проводимых на СРЛС. Будем учитывать, что сигналы (команды) на применение СРЛС по назначению (на проведение других режимов) поступают, в случайные моменты времени t_k и образуют простейший поток с параметрами α_i ($\theta_i, \gamma_i, \beta_i, \Delta_i$), причем характер выполняемых СРЛС задач таков, что их решение должно быть начато строго в момент t_k , в противном случае задача по k -му сигналу считается невыполнимой.

Если за время t_0 , начиная с момента t_k , СРЛС не откажет, то задача считается выполненной полностью (например, радиолокационный сеанс) и СРЛС переводится в режим подготовки, а затем или в РГ, или в P_0 , или другие, если не наступил отказ.

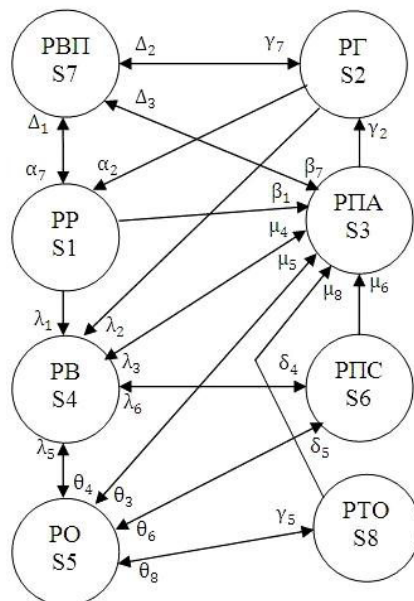


Рис. 1. Граф состояний и переходов СРЛС:

- S1 – РЛС исправна, подготовлена и применяется по назначению (рабочий режим – PP);
- S2 – РЛС исправна, подготовлена и готова к применению (режим готовности – РГ);
- S3 – РЛС исправна, готовится к применению (режим подготовки аппаратуры – РПА);
- S4 – РЛС отказала и идет устранение отказа (режим восстановления – PB);
- S5 – РЛС включена и находится в режиме ожидания (PO);
- S6 – режим подготовки судоводителя к использованию РЛС (РПС);
- S7 – на РЛС воздействуют различные виды помех (РВП);
- S8 – на РЛС проводится техническое обслуживание (РТО)

В качестве показателя готовности СРЛС к применению выбираем вероятность пребывания СРЛС в состоянии 2, т. к. её исправное состояние является необходимым, но недостаточным условием готовности СРЛС к применению в требуемый момент времени. Действительно, если СРЛС в момент t_k находится в РР или РПА, то задача по сигналу $(k + 1)$ не будет выполнена, т. к. СРЛС к этому не готова. Очевидно, что СРЛС будет готова к применению только при нахождении в состоянии 2, т. е. когда она исправна, подготовлена и не занята выполнением целевых задач.

Таким образом, показатель готовности P_2 для СРЛС следует трактовать как вероятность того, что СРЛС исправна, подготовлена и не занята решением задач, т. е. готова к выполнению целевых задач. Эта вероятность, в свою очередь, численно равна вероятности того, что СРЛС находится в режиме готовности P_2 . К определению этой вероятности и сводится задача оценивания показателя готовности РГ СРЛС к применению.

Представляя функционирование СРЛС в виде марковского процесса, найдем аналитическое выражение для показателя готовности СРЛС $РГ = P_2$. Кратко изложим суть обобщенной модели функционирования СРЛС (рис. 1) и введем условные обозначения и принятые допущения.

Пусть СРЛС в исходном состоянии находится в РО, из которого она может перейти либо в РПА с интенсивностью μ_5 , либо в РВ с интенсивностью λ_5 и вернуться после восстановления в РО с интенсивностью θ_4 , либо в РПС с δ_5 , либо в РТО с γ_5 . После режима ТО СРЛС может перейти в РО с θ_8 , либо в РПА с μ_8 . В РПС может СРЛС перейти либо в РВ λ_6 и при восстановлении вернуться в РПС с δ_4 , либо в РО с θ_6 , либо в РПА с μ_6 . Из РПА возможны переходы в РГ с γ_3 , РВП с Δ_3 , в РВ с λ_3 , в РО с θ_3 . Из РВ возможны переходы в РПА с μ_4 в РО с θ_4 , в РПС с δ_4 . Из РГ возможны переходы в РР с α_2 , в РВП с Δ_2 , в РВ с λ_2 , из РР в РВП с Δ_2 , РВ с λ_1 , РПА с β_1 , из РВП в РР с α_7 , РГ с γ_7 , в РПА с β_7 . На практике может возникать потребность оценивания готовности и для частных математических моделей функционирования, например без учета РТО, без учета воздействия помех (РВП), без учета РВ и т. д.

Обозначение и физический смысл интенсивностей:

- λ_i ($i = 1-6$) – интенсивность отказов аппаратуры и судоводителя в i -м режиме;
- $\mu_4, \delta_4, \theta_4$ – интенсивность восстановления аппаратуры и судоводителя;
- γ_5 – интенсивность поступление команд на проведение ТО;
- θ_8, μ_8 – интенсивность выполнения ТО при переходе СРЛС в РО, РПА соответственно после завершения ТО;
- λ_6, μ_6 – интенсивность подготовки аппаратуры и судоводителя соответственно;
- α_2, β_1 – интенсивность поступления команд на применение и применение по назначению соответственно;
- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ ($\alpha_7, \gamma_7, \beta_7$) – интенсивность воздействия помех в РР, РГ, РПА соответственно;
- $\theta_3, \theta_6, (\theta_8)$ – интенсивность подготовки аппаратуры, судоводителя при переводе в РО (по окончании РТО).

В общем случае интенсивность мероприятия (воздействия) – это величина, обратная среднему времени проведения этого мероприятия, т. е. система переходит из состояния в состояние под воздействием простейших потоков.

Обозначим $P_i(t)$, $i = 1-8$ – вероятность нахождения СРЛС в момент времени t в соответствующем i -м режиме. Так как при сделанных допущениях процессы функционирования СРЛС являются марковскими, то существуют следующие пределы:

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t), \quad i = 1-8 \quad \text{и} \quad P_G = \lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t) = P_2 \quad \text{при} \quad t \rightarrow \infty, \quad (2)$$

т. е. можно ограничиться алгебраическими уравнениями для стационарного процесса, т. к. $dP_i/dt = 0$.

Для нахождения аналитического выражения показателя готовности $P_G = P_2$ в соответствии с графом состояний и переходов СРЛС (рис. 1) запишем инфинитезимальную матрицу \bar{A} :

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} -A_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 & 0 \\ 0 & -A_2 & \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & \gamma_7 & 0 \\ \beta_1 & 0 & -A_3 & \mu_4 & \mu_5 & \mu_6 & \beta_7 & \mu_8 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & -A_4 & \lambda_5 & \lambda_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 & \theta_4 & -A_5 & \theta_6 & 0 & \theta_8 \\ 0 & 0 & 0 & \delta_4 & \delta_5 & -A_6 & 0 & 0 \\ \Delta_1 & \Delta_2 & \Delta_3 & 0 & 0 & 0 & -A_7 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & 0 & \gamma_5 & 0 & 0 & -A_8 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$A_1 = \beta_1 + \lambda_1 + \Delta_1; \quad A_2 = \alpha_2 + \lambda_2 + \Delta_2; \quad A_3 = \gamma_3 + \lambda_3 + \theta_3 + \Delta_3 + \mu_3;$$

$$A_4 = \mu_4 + \theta_4 + \delta_4; \quad A_5 = \mu_5 + \lambda_5 + \delta_5 + \gamma_5; \quad A_6 = \mu_6 + \lambda_6 + \theta_6;$$

$$A_7 = \alpha_7 + \gamma_7 + \beta_7; \quad A_8 = \mu_8 + \theta_8,$$

и систему алгебраических уравнений для вероятностей P_i :

$$\left. \begin{aligned} A_1 P_1 &= \alpha_2 P_2 + \alpha_7 P_7; \\ A_2 P_2 &= \gamma_3 P_3 + \gamma_7 P_7; \\ A_3 P_3 &= \beta_1 P_1 + \sum_{i=4}^6 \mu_i P_i + \beta_7 P_7 + \mu_8 P_8; \\ A_4 P_4 &= \sum_{i=1, i \neq 4}^6 \lambda_i P_i; \\ A_5 P_5 &= \sum_{i=3, i \neq 5, 7}^8 \theta_i P_i; \\ A_6 P_6 &= \delta_4 P_4 + \delta_5 P_5; \\ A_7 P_7 &= \sum_{i=1}^3 \Delta_i P_i; \\ A_8 P_8 &= \mu_3 P_3 + \gamma_5 P_5; \sum_{i=1}^8 P_i = 1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В результате решения уравнений системы (4) получим выражение для показателя готовности СРЛС к применению $РГ = P_2$ и выражения для вероятности пребывания СРЛС в любом i -м состоянии P_i :

$$РГ = P_2 = (1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^8 K_i)^{-1}; P_i = K_i (1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^8 K_i)^{-1}, \quad (5)$$

где

$$K_7 = (\alpha_2 \Delta_1 / A_1 + \Delta_2 + A_2 \Delta_3 / \gamma_3) (A_7 + \gamma_7 \Delta_3 / \gamma_3 - \alpha_7 \Delta_1 / A_1)^{-1}; K_3 = (A_2 - K_7 \gamma_7) \gamma_3^{-1};$$

$$K_1 = (\alpha_2 + / K_7 \alpha_7) / A_1; K_4 = A_{11} + K_6 A_{12}; K_5 = A_9 + K_6 A_{10};$$

$$K_6 = (\delta_4 A_{11} + \delta_6 A_9) / (A_6 - \delta_4 A_{12} - \delta_5 A_{10}); K_8 = (\mu_3 K_3 + \gamma_5 K_5) / A_8; A_8 = K_1 \lambda_1 + \lambda_2 + K_3 \lambda_3;$$

$$A_9 = (K_3 Z_1 A_4 + \theta_4 A_8) / (A_4 Z_2 - \theta_4 \lambda_5); Z_1 = A_3 + \mu_8 / A_8; Z_2 = A_5 - \gamma_3 \theta_8 / A_8;$$

$$A_{10} = (\theta_4 \lambda_6 + \theta_6 A_4) / (A_4 Z_2 - \theta_4 \lambda_5); A_{11} = (A_8 + A_9 \lambda_5) / A_4; A_{12} = (A_{10} \lambda_5 + \lambda_6) / A_4.$$

Таким образом, изложенный метод нахождения аналитической зависимости для показателя готовности СРЛС позволяет учесть характерные условия применения и динамику их функционирования и представить математическую модель оценивания готовности СРЛС как функцию интенсивности отказов аппаратуры и судоводителя и средних значений времени их восстановления, времени подготовки к применению, времени выполнения целевых задач, времени ожидания между очередными применениями по назначению, времени воздействия помех, периодичности и продолжительности проведения технического обслуживания.

Обсуждение и выводы

Рассмотренный метод позволяет получить из выражения (5) ряд частных моделей. Так, для случая, когда исследуется готовность между периодическими ТО, т. е. РТО отсутствует на рис. 1, уравнение (5) примет вид

$$P_2^I = 1 / [1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^7 K_i]; P_i^I = K_i \left(\frac{1}{[1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^7 K_i]} \right), \quad (6)$$

где

$$A_1 = \lambda_1 + \beta_1 + \Delta_1; A_2 = \alpha_2 + \Delta_2 + \lambda_2; A_3 = \gamma_3 + \Delta_3 + \lambda_3 + \theta_3; A_4 = \mu_4 + \theta_4 + \delta_4; A_5 = \lambda_5 + \mu_5 + \delta_5;$$

$$A_6 = \mu_6 + \lambda_6 + \theta_6; A_7 = \alpha_7 + \gamma_7 + \beta_7; K_7 = \frac{\alpha_2 \Delta_1 A_1 - 1 + \Delta_2 + A_2 \Delta_3 \gamma_3^{-1}}{A_7 + \gamma_7 \Delta_3 \gamma_3 - 1 - \alpha_7 \Delta_1 A_1}; K_3 = (A_2 - K_7 \gamma_7) \gamma_3^{-1};$$

$$K_4 = (\alpha_3 + K_7 \alpha_7) A_1^{-1}; K_4 = A_{11} + K_6 A_{12}; K_5 = A_9 + K_6 A_{10}; K_6 = \frac{\delta_4 A_{11} + \delta_6 A_9}{A_8 - \delta_4 A_{12} - \delta_5 A_{10}};$$

$$A_8 = K_1 \lambda_1 + \lambda_2 + K_3 \lambda_3; A_9 = \frac{K_2 \theta_3 A_4 + \theta_4 A_8}{A_4 A_5 - \theta_6 \lambda_5}; A_{10} = \frac{\theta_4 \lambda_6 + \theta_6 A_4}{A_4 A_5 + \theta_6 \lambda_5}; A_{11} = (A_8 + A_9 \lambda_5) / A_4;$$

$$A_{12} = (A_{10} \lambda_5 + \lambda_6) / A_4.$$

Когда исследуется готовность без учета воздействия помех (РВП) и проведения РТО, то выражение (5) принимает вид

$$P_2^{\text{II}} = 1 / (1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^6 K_i); P_i^{\text{II}} = 1 / K_i (1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^6 K_i), \quad (7)$$

где

$$A_1 = \lambda_1 + \beta_1; A_2 = \lambda_2 + \alpha_2; A_3 = \lambda_3 + \gamma_3 + \lambda_3 + \theta_8; K_2 = \frac{A_2}{\gamma_3}; A_4 = \mu_4 + \delta_4 + \theta_4; A_5 = \lambda_5 + \gamma_5 + \delta_5;$$

$$A_6 = \lambda_6 + \mu_6 + \theta_6; A_7 = \mu_5 - \left(\frac{\mu_7 \delta_5}{\delta_4} \right); K_1 = \frac{\alpha_2}{A_1}; K_6 = \frac{K_1 \beta_1 + K_3 A_3 + \frac{A_7 K_3 \theta_3}{A_8}}{A_6 + \mu_4 \delta_4^{-1} + \mu_6 + \frac{A_7 A_9}{A_5}}; K_5 = \frac{\frac{K_3 \theta_3}{A_5} + K_6 A_9}{A_8};$$

$$K_4 = \frac{K_6 A_1}{A_4} - \frac{K_5 \delta_5}{\delta_4}; A_9 = (A_6 \theta_4 + \theta_6 \delta_4) / (\delta_4 A_6); A_8 = 1 + (\delta_5 \theta_4 / \delta_4 A_5).$$

Если не требуется учитывать влияние на готовность СРЛС судоводителя, воздействия помех и технического обслуживания, т. е. режимы РПС, РВП, РТО на рис. 1 отсутствуют, то выражение (5) принимает вид

$$P_2^{\text{III}} = 1 / \left[1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^5 K_i \right]; P_i^{\text{III}} = K_i \left(1 / \left[1 + \sum_{i=1, i \neq 2}^7 K_i \right] \right), \quad (8)$$

где

$$A_1 = \lambda_1 + \beta_1; A_2 = \lambda_2 + \alpha_2; A_3 = \lambda_3 + \gamma_3 + \theta_3; A_4 = \mu_4 + \theta_4; A_5 = \lambda_5 + \mu_5; K_1 = \alpha_2 / A_1;$$

$$K_3 = A_2 / \gamma_3; K_5 = (K_3 \theta_3 + K_4 \theta_4) / A_5; K_4 = (A_2 A_3 / \gamma_3 - \alpha_2 \beta_1 / A_1 - A_2 \theta_3 \mu_5 / \gamma_3 A_5) / (\mu_4 + \theta_4 \mu_5 A_5^{-1})$$

Для случая, когда СРЛС характеризуется только четырьмя режимами (РР, РГ, РВ и РПА), выражение (5) имеет вид

$$P_2^{\text{IV}} = (\mu_4 \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1)) / (\alpha_2 \gamma_3 (\lambda_1 + \mu_4) + \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) (\lambda_2 + \mu_4) + (\lambda_1 + \beta_1) (\lambda_2 + \alpha_2) (\lambda_3 + \mu_4)). \quad (9)$$

Из выражения (9) при $\lambda = \gamma^{-1} = 0$ и $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ следует, что $P_2 = K_r = \mu (\lambda + \mu)^{-1}$, т. к. при этих условиях СРЛС функционирует как дихотомическая система. Очевидно, что такое допущение не отражает специфики эксплуатации СРЛС, поэтому использование выражения (1) для оценивания готовности СРЛС весьма ограничено, т. к. оно дает заведомо завышенный результат.

Результаты расчетов по предложенному методу для СРЛС «НАЯДА-25» представлены на рис. 2.

Рассмотрим зависимость P_2 от параметра α_2 , о характере которой даёт представление кривая I (рис. 2), полученная по формуле (9) при некоторых фиксированных значениях $\lambda_i, \mu, \beta, \gamma$.

С увеличением α_2 значение РГ уменьшается, что важно учитывать при создании и эксплуатации СРЛС, и оценку их готовности и эффективности (пропускной способности) проводить необходимо с учетом динамики функционирования и ожидаемой интенсивности использования СРЛС.

Графическая зависимость 3 (рис. 2) получена по выражению (1) при тех же параметрах λ, μ . По сравнению с кривой 2 мы видим завышенный результат, причем это завышение тем больше, чем больше α_2 .

Приведем некоторые частные зависимости для показателя готовности СРЛС, полученные из выражения (9), которые весьма полезны для решения многих практических задач. Так, подставив в выражение (9) $\gamma^{-1} = 0$, получим

$$P_2 = \mu_4(\lambda_1 + \beta_1) / (\alpha_2(\lambda_1 + \mu_4) + (\lambda_1 + \beta_1)(\lambda_2 + \mu_4)). \quad (10)$$

Зависимость P_2 от α_2 (кривая 2 на рис. 2) рассчитывается по формуле (10), при тех же значениях λ_i, β, μ , что и кривая 1 на рис. 2 по формуле (9), соответствует тем возможным (наибольшим) значениям показателя готовности СРЛС, которые могут быть достигнуты за счет уменьшения среднего времени подготовки γ^{-1} и интенсивности отказов в режиме подготовки λ_3 при фиксированных остальных значениях параметров. Следовательно, выражения (9) и (10) позволяют в конкретных условиях определять принципиальную возможность достижения некоторого требуемого значения P_2 за счет уменьшения γ^{-1} и λ_3 . Так, например, если требуемое значение P_2 лежит ниже кривой 2, то такая возможность существует, если же требуемое значение P_2 лежит выше кривой 2, то для его обеспечения одного уменьшения γ^{-1} и λ_3 уже недостаточно и необходимо изменять другие параметры, т. е. принимать другие меры.

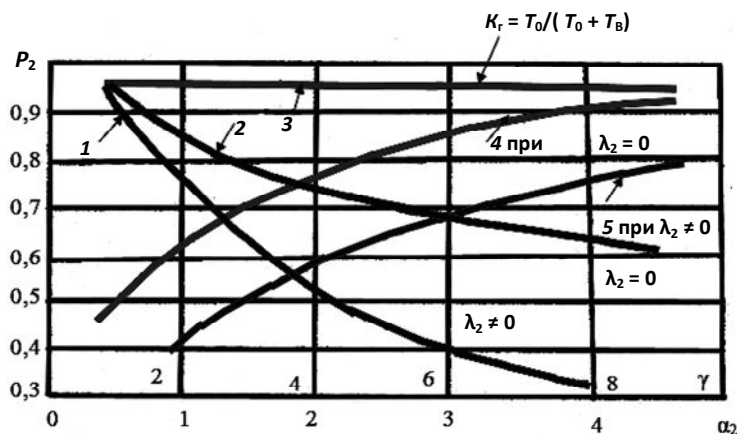


Рис. 2. Графики зависимости P_2 от $\alpha, \gamma, \lambda_i$

Совместное использование выражений (9) и (10) позволяет оценить и максимальную величину возможного увеличения P_2 по сравнению с уже достигнутым его значением при данных γ^{-1} и λ_3 и по величине этого приращения определить целесообразность мер по дальнейшему уменьшению γ^{-1} и λ_3 . Из рис. 2 следует, что при α_2 больше 1 эти меры очевидны, а при α_2 меньше 1 более эффективными могут оказаться другие пути повышения P_2 (кривые 1, 2). Подобный анализ может быть проведен при любых значениях параметров, входящих в выражения (2)–(10).

Рассмотренные примеры далеко не исчерпывают возможности практического использования зависимостей (2)–(10), однако они показывают, что рассмотренный метод оценивания готовности СРЛС позволяет достаточно объективно и с количественной стороны подходить ко всем мероприятиям по повышению или обеспечению на требуемом уровне готовности к применению P_2 или эффективности функционирования СРЛС как в процессе создания, так и при их эксплуатации. Аналогично проводятся исследования и количественная оценка влияния на готовность СРЛС других показателей процесса функционирования и условий применения. Например, на рис. 2 кривые 4 и 5 дают представление о характере изменений P_2 от $\lambda_i, \gamma, \alpha^2$.

Из выражений (9) и (10) можно получить и другие зависимости. Так:

– при $\lambda_1 = 0$:

$$P_2 = (\mu_4 \gamma_3 \beta_1) / (\alpha_2 \gamma_3 \mu_4 + \gamma_3 \beta_3 (\lambda_2 + \mu_4) + \beta_1 (\lambda_2 + \alpha_2) (\lambda_3 + \mu_4)); \quad (11)$$

– при $\lambda_2 = 0$:

$$P_2 = \mu_4 \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) (\alpha_2 \gamma_3 (\lambda_1 + \mu_4) + \mu_4 \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) + \alpha_2 (\lambda_1 + \beta_1) (\lambda_3 + \mu_4))^{-1}; \quad (12)$$

– при $\lambda_3 = 0$:

$$P_2 = \mu_4 \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) (\alpha_2 \gamma_3 (\lambda_1 + \mu_4) + \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) (\lambda_2 + \mu_4) + \mu_4 (\lambda_1 + \beta_1) (\lambda_2 + \alpha_2))^{-1}; \quad (13)$$

– при $\mu_4 = 0$:

$$P_2 = \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) (\alpha_2 \gamma_3 + \gamma_3 (\lambda_1 + \beta_1) + (\lambda_1 + \beta_1) (\lambda_2 + \alpha_2))^{-1}. \quad (14)$$

Эти выражения позволяют получить те предельные значения P_2 , превышение которых только за счет уменьшения соответственно отказов в РР λ_1 (11), в РГ λ_2 (12), в РП λ_3 (13) и среднего времени восстановления $T_b = \mu_4^{-1}$ в РВ (14) невозможно при фиксированных значениях остальных параметров. При необходимости подобные зависимости могут быть получены и для любой модели функционирования и комбинаций как характеристик надежности СРЛС ($\lambda_i, \mu_i, \delta_i$), так и параметров, оценивающих динамику функционирования и условия применения ($\alpha_i, \Delta_i, \gamma_i$ и т. д.).

На практике так же важно знать характер влияния как отдельного, так и совокупности параметров процесса функционирования и условий применения на готовность СРЛС. Для этого необходимо продифференцировать полученные исследуемые выражения (2)–(10) по каждому анализируемому параметру, получить частные производные и, исследуя знак первой производной и подставляя в полученные выражения частных производных значения параметров, характерных для СРТС, определить область возрастания (убывания) P_2 . Подобные исследования позволяют определить вид и диапазоны изменения управляемых параметров системы обеспечения готовности СРЛС на этапах разработки, создания и эксплуатации.

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод и полученные с его использованием аналитические зависимости представляют математические модели оценивания готовности СРЛС к применению, подтверждают его работоспособность и позволяют провести всестороннюю количественную оценку как комплексного, так и индивидуального влияния основных параметров, характеризующих процесс функционирования и условия применения СРЛС на их готовность, и на этой основе определять, за счет изменения каких управляемых параметров, на каких направлениях и на какую величину можно достигнуть увеличения P_2 до заданного уровня в тех или иных условиях. Это, в свою очередь, даст возможность находить оптимальные пути обеспечения (повышения) готовности СРЛС с учетом реальных возможностей, а также решать ряд других практических задач, возникающих при создании и эксплуатации СРЛС. Заметим, что, используя предложенный метод, можно получать математические модели оценивания готовности для различных СРТС, характеризующихся особенностями эксплуатации, динамикой функционирования и условиями применения, а также вероятностно-временных показателей других эксплуатационных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев В. И. Современные навигационные системы и безопасность судоходства / В. И. Дмитриев, В. И. Форафонов. М.: Моркнига, 2010. 158 с.
2. Судовые радионавигационные системы: учеб. / под ред. Ю. М. Устинова. СПб.: Веленара, 2010. 372 с.
3. Адерихин И. В. Метод оценивания готовности РТС с учетом динамики функционирования / И. В. Адерихин // Тр. Науч.-исслед. ин-та радио. 1982. № 4. С. 106–114.
4. Адерихин И. В. Оценка показателей эксплуатационных свойств РЭС / И. В. Адерихин, А. Я. Алексеенко, И. В. Конкевич. М.: МО СССР, 1989. 116 с.
5. Адерихин И. В. Метод оценивания готовности пунктов управления летательными аппаратами / И. В. Адерихин, А. В. Сапронов // Изв. Акад. наук СССР. Техническая кибернетика. 1991. № 6. С. 89–95.

6. Адерихин И. В. Метод оценивания показателей готовности системы управления судном / И. В. Адерихин, М. Г. Воротынцева // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2005. № 2 (25). С. 199–203.

Статья поступила в редакцию 17.02.2015,
в окончательном варианте – 8.06.2015

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Адерихин Иван Владимирович – Россия, 117105, Москва; Московская государственная академия водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Управление судном и технические средства судовождения»; a7963180@yandex.ru.

Воротынцева Марина Георгиевна – Россия, 414014, Астрахань; Каспийский институт морского и речного транспорта; филиал Волжского государственного университета водного транспорта; канд. техн. наук; доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины»; marina.ast@bk.ru.

Цветкова Людмила Викторовна – Россия, 117105, Москва; Московская государственная академия водного транспорта; аспирант кафедры «Управление судном и технические средства судовождения»; pisecorca@bk.ru.



I. V. Aderikhin, M. G. Vorotyntseva, L. V. Tsvetkova

METHOD AND MATHEMATICAL MODELS OF ASSESSMENT OF AVAILABILITY OF THE MARINE RADIO AIDS

Abstract. The paper considers the use of the state-space method as the most useful for assessment of the availability of marine radio aids. In order to implement the method, a functional model for the marine radar as a marked state and transition graph is designed, state subsets with cumulative containment probability, which allows to find the availability index for the marine radar (or availability of any marine radar status), are chosen. Representing the functioning of the marine radar as the Markov's process, finding the analytical form of the availability index in relation with the state and transition graph of the marine radar become possible due to recording of the infinitesimal matrix and algebraic equation system for the probabilistic determination of radar aids in any states. While solving the equations, an expression for the availability index as well as expressions for the probability of containment of the marine radar in any state are received. The method under discussion and the received analytical dependencies allow to evaluate the influence of the parameters of the marine radar functioning on their availability as well as to define due to what changes of the parameters, what directions and what capacity one can increase the availability index to the set level under various conditions.

Key words: marine radio aids, methodology, mathematical models of availability assessment, availability, indicators, dynamics of the operation, application mode and conditions.

REFERENCES

1. Dmitriev V. I., Forafonov V. I. *Sovremennye navigatsionnye sistemy i bezopasnost' sudovozhdeniia* [Present navigation systems and navigation safety]. Moscow, Morkniga Publ., 2010. 158 p.
2. *Sudovye radionavigatsionnye sistemy* [Marine radio navigation systems]. Pod redaktsiei Iu. M. Ustinova. Saint-Petersburg, Velenara Publ., 2010. 372 p.
3. Aderikhin I. V. Metod otsenivaniia gotovnosti RTS s uchetom dinamiki funktsionirovaniia [Method of assessment of the radio aids availability taking into account the functional dynamics]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*, 1982, no. 4, pp. 106–114.
4. Aderikhin I. V., Alekseenko A. Ia., Konkevich I. V. *Otsenka pokazatelei ekspluatatsionnykh svoistv RES* [Assessment of the indices of the operational parameters]. Moscow, MO SSSR, 1989. 116 p.

5. Aderikhin I. V., Saprnov A. V. Metod otsenivaniia gotovnosti punktov upravleniia letatel'nyimi apparatami [Method of assessment of the availability of the aircraft stations]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaiia kibernetika*, 1991, no. 6, pp. 89–95.

6. Aderikhin I. V., Vorotyntseva M. G. Metod otsenivaniia pokazatelei gotovnosti sistemy upravleniia sudnom [Method of assessment of the availability indices of the navigation system]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 2 (25), pp. 199–203.

The article submitted to the editors 17.02.2015,
in the final version – 8.06.2015

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aderikhin Ivan Vladimirovich – Russia, 117105, Moscow; Moscow State Academy of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department "Ship Management and Technical Means of Navigation"; a7963180@yandex.ru.

Vorotyntseva Marina Georgievna – Russia, 414014, Astrakhan; Caspian Institute of Sea and River Transport; Branch of the Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department "Engineering Disciplines"; marina.ast@bk.ru.

Tsvetkova Lyudmila Viktorovna – Russia, 117105, Moscow; Moscow State Academy of Water Transport; Postgraduate Student of the Department "Ship Management and Technical Means of Navigation"; niceorca@bk.ru.

