

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2023-2-5-13

УДК 621.396.65

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОГО БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ СВЯЗИ

Леньшин Андрей Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»¹.

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Шаталов Евгений Владимирович

кандидат технических наук, начальник управления ГИБДД Главного Управления Министерства Внутренних Дел России по Воронежской области².

E-mail: evgen1778@mail.ru

¹Адрес: 394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

²Адрес: 394038, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Холмистая, д. 56.

Аннотация: Предложены методический подход к формированию (обоснованию) требований и методика обеспечения показателей надёжности радиоканала перспективного бортового комплекса средств связи, использующего сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и фазоманипулированных широкополосных сигналов, на фоне значительного возрастания интенсивности применения авиации и повышения требований по своевременности и достоверности передачи динамично изменяющейся разнородной информации на борт летательного аппарата в реальном масштабе времени. Методика базируется на использовании допустимых значений коэффициента простоя, вероятности безотказной работы и коэффициента оперативной готовности. Разработана имитационная модель функционирования бортового комплекса связи в условиях воздействия помех, отражающая соответствующие этапы процесса передачи данных в комплексе. Показано, что различные виды резервирования (структурного, функционального, нагрузочного) следует проводить до достижения заданных (требуемых) показателей надёжности элементов (блоков) бортового комплекса средств связи.

Ключевые слова: бортовой комплекс средств связи, радиоканал связи, надёжность радиоканала, коэффициент оперативной готовности, вероятность безотказной работы.

Отличительной чертой вооружённых конфликтов последнего времени является значительное возрастание интенсивности применения авиации и повышение требований по достоверности передачи информации, команд управления на борт летательного аппарата (ЛА), к скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи. Одновременно обостряются проблемные аспекты эксплуатации и обеспечения требуемой надёжности. Эффективность применения авиации при решении разнообразных боевых задач в значительной мере определяется возможностями бортовых средств

и комплексов связи (БКСС) [1].

Проблема обеспечения надёжности БКСС в условиях воздействия организованных и непреднамеренных помех наилучшим образом может быть решена при использовании сигналов с расширением спектра (СРС) [2, 3]. Для обеспечения фронтовой, истребительной и армейской авиации высокоскоростной цифровой связью, а также совместного использования с наземными подразделениями сухопутных войск в бортовых комплексах средств связи предусмотрены режим помехозащищённой связи с псевдослучайной перестройкой рабочей

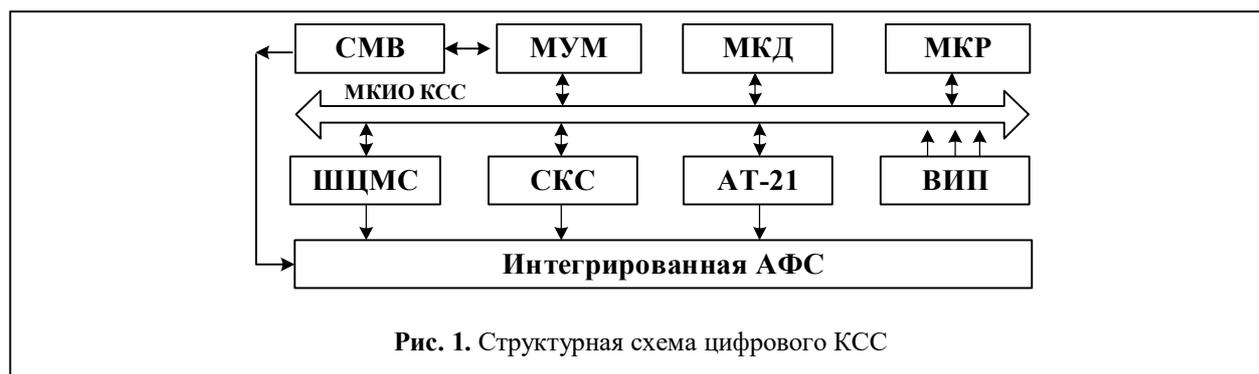


Рис. 1. Структурная схема цифрового КСС

частоты (ППРЧ) и использование фазоманипулированных широкополосных сигналов (ФМШПС).

Целью статьи является разработка методики обеспечения показателей надёжности перспективного БКСС, использующего сигналы с расширенным спектром — сигналы с ППРЧ и ФМШПС.

Цифровой комплекс средств связи (КСС), структурная схема которого представлена на рис. 1, реализует концепцию «software-defined radio». На рис. 1 введены обозначения: СМВ — модуль СМВ связи; МУМ — модуль управления и маршрутизации; МКД, МКР — модули криптозащиты данных и речи; ШЦМС — широкополосный цифровой модуль связи; СКС — модуль самолётно-космической связи; АТ-21 — авиационный терминал ОСНОД. Важной особенностью КСС (рис. 1) является использование сантиметрового диапазона длин волн (модуль СМВ) и самолётно-космической связи (модуль СКС) [1].

Для цифровых систем с многоуровневой ЧМн форма сигнала в i -ом интервале передачи $iT_s < t < (i+1)T_s$ (T_s — длительность информационного символа) может быть записана в виде

$$s(t) = \sqrt{2P_s} \sin[2\pi(f_0 + a_i \Delta f)t + \varphi_i], \quad (1)$$

где f_0 — несмещённая минимальная несущая частота; Δf — минимальный разнос по частоте между сигналами в M -ичной последовательности; a_i — значение i -ого символа данных, взятое из последовательности целых чисел $1, 2, \dots, M$.

Без учёта модуляции данных методом M -ичной ЧМн, которая не изменяет спектральные свойства сигнала,

$$s(t) = \sqrt{2P_s} \sin \left[2\pi \left[f_0 + \frac{n_i + 0,5}{T_h} \right] t + \varphi_i \right], \quad (2)$$

где $iT_h \leq t \leq (i+1)T_h$; $n_i \in \{0, 1, 2, \dots, M_f\}$ [3].

Бинарный фазоманипулированный широкополосный сигнал (ФМШПС) имеет вид

$$s(t) = \sqrt{2P_s} p(t)d(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_0], \quad (3)$$

где $p(t)$ — расширяющая спектр псевдослучайная последовательность (ПСП) с длительностью чипа τ_c ; $d(t)$ — последовательность информационных бит длительностью T_b . Предполагается также, что каждый бит данных модулируется N чипами, т.е. $T_b = N\tau_c$ [4].

Сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK) можно записать в виде

$$s_{\text{QPSK}}(t) = q(t) \cos \left[\omega_0 t + a_k \frac{\pi}{4} \right], \quad (4)$$

где $\mathbf{a} = \{a_k\} = \{-3, -1, 1, 3\}$ — множество нормированных амплитуд импульсов цифрового модулирующего сигнала, соответствующих множеству абсолютных значений фазы модулированного сигнала $\boldsymbol{\theta} = \{\pm\pi/4, \pm3\pi/4\}$ [5].

Причиной отказов средств связи из состава БКСС является множество взаимосвязанных факторов, но основные из них в большинстве случаев связаны с ошибками диагностирования БКСС. Одним из направлений поддержания надёжности РЭА является своевременная организация работ в системе технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) [6, 7].

Результат воздействия на информационный сигнал среды распространения (как правило, со случайно изменяющимися параметрами) может быть описан, исходя из общей теории и статистических характеристик канала радиосвязи [8]. В качестве методического подхода к формированию (обоснованию) требований к показателям надёжности радиоканала перспективного БКСС, использующего СРС (сигналы с ППРЧ и ФМШПС), предлагается следующая последовательность процедур.

1. Первая процедура включает определение минимально допустимых значений коэффициента готовности $K_{\Gamma}^{\text{доп}}$ или максимально допустимых значений коэффициента простоя $K_{\Pi}^{\text{доп}}$

$$K_{\Gamma} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \geq K_{\Gamma}^{\text{доп}}, \quad (5)$$

$$K_{\Pi} \leq K_{\Pi}^{\text{доп}} = 1 - K_{\Gamma}^{\text{доп}}, \quad (6)$$

где MTBF (Mean Time Between Failure) — среднее время наработки на отказ; MTTR (Mean Time To Repair) — среднее время восстановления работоспособности.

Методический подход к выбору параметров БКСС в соответствии с требованиями к аппаратной надёжности можно представить следующим образом.

1.1. Выбрать значение параметра C в соответствии с требованиями к надёжности

$$C(K_{\Gamma}) = 1 - \frac{\ln(-\ln K_{\Gamma})}{\ln N}, \quad (7)$$

где K_{Γ} — требуемый коэффициент готовности; N — число узлов воздушной сети.

1.2. Оценить пороговое значение вероятности связности абонентов, полагая, что сеть однородна, т.е. все абоненты равноценны и имеют одинаковые возможности,

$$P_{\text{св.а}}(K_{\Gamma}) = C(K_{\Gamma}) \cdot \frac{\ln N}{N}. \quad (8)$$

Показатель надёжности БКСС является основным показателем, необходимым при проектировании и эксплуатации комплекса. Включение в модель вероятностей исправного состояния (или отказа) элементов БКСС позволяет учесть аппаратную надёжность.

2. В ходе второй процедуры необходимо определить минимально допустимую вероятность безотказной работы в течение интервала времени $[0, t_c]$

$$P_{\text{БР}}(t_c) \geq P_{\text{БР}}^{\text{доп}}(t_c). \quad (9)$$

3. Третья процедура включает в себя обоснование минимально допустимого значения среднего времени наработки на отказ $T_{\text{Ср.НО}}^{\text{доп}}$

$$T_{\text{Ср.НО}} = \frac{1}{N_{\text{отк}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{отк}}} T_{\text{НО}_i} \geq T_{\text{Ср.НО}}^{\text{доп}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{отк}}$ — количество отказов; $T_{\text{НО}_i}$ — время наработки на отказ i -го элемента.

4. Четвертая процедура включает в себя обоснование максимально допустимого значения времени восстановления $T_{\text{В}}^{\text{доп}}$

$$T_{\text{В}} = \frac{1}{N_{\text{отк}}} \sum_{i=1}^N t_{\text{вос}_i} \geq T_{\text{В}}^{\text{доп}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{вос}_i}$ — время восстановления i -го отказа элемента.

5. Пятая процедура подразумевает необходимость определения минимально допустимого значения коэффициента оперативной готовности $K_{\text{ог}}^{\text{доп}}$

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} \cdot P(t_c) \geq K_{\text{ог}}^{\text{доп}}, \quad (12)$$

где $P(t_c)$ — вероятность того, что в произвольный момент времени устройство будет работоспособно.

В воинских частях ВВС (ВКС) МО РФ проводится планомерная работа по обновлению схемы войскового ремонта (ВР), ведется пересмотр подходов к организации ТО и Р цифровых БКСС, поступающих на вооружение. Разработаны предложения по построению и организации ВР, в системе ТО и Р на трёх стадиях эксплуатации перспективных БКСС [7] (1 — агрегатный ремонт БКСС л/с групп обслуживания инженерно-авиационной службы (ИАС); 2 — ремонт БКСС в ТЭЧ авиаполка; 3 — ремонт конструктивно съёмных единиц в условиях войсковых авиаремонтных мастерских).

Методика обеспечения заданных показателей надёжности перспективного БКСС включает в себя несколько этапов. На первом этапе уточняется структурная схема (рис. 1) радиоканала БКСС (среда распространения радиосигнала (СРР), а также источники организованных и непреднамеренных помех (ИП) на рис. 1 не показаны) без резервирования.

На втором этапе с помощью (5) устанавливаем минимально допустимое значение коэффициента готовности $K_{\Gamma}^{\text{доп}}$ и с помощью (7) выбираем значение параметра $C(K_{\Gamma})$ в соответствии с требованиями к надёжности БКСС. С помощью выражения (8) определяем пороговое значение вероятности связности абонентов БКСС $P_{\text{CB}_A}(K_{\Gamma})$.

На третьем этапе на основании выражения (6) и рис. 1 вычисляем значения коэффициентов простоя K_{Π} элементов радиоканала БКСС

$$K_{\Pi} = \sum_{i=1}^N K_{\Pi i} = K_{\Pi \text{ смв}} + K_{\Pi \text{ мум}} + K_{\Pi \text{ мкд}} + K_{\Pi \text{ мкр}} + K_{\Pi \text{ шимс}} + K_{\Pi \text{ мкно}} + K_{\Pi \text{ скс}} + K_{\Pi \text{ ат-21}} + K_{\Pi \text{ вип}} + K_{\Pi \text{ афс}} + (1 - K_{\Gamma}^{\text{СРР}}), \quad (13)$$

где $K_{\Pi i}$ — коэффициенты простоя i -го элемента БКСС; N — количество элементов.

Среду распространения радиосигнала (СРР) предлагается описывать с использованием показателя анизотропии радиоканалов — вероятности установления соединения $P_{\text{yc}}(d, f_k, C)$ в направлении передачи данных d на частоте f_k при заданной скорости C . Воздействие преднамеренных или непреднамеренных помех на радиоканал [2, 9] учитывается количеством поражённых (непригодных) для каждого направления передачи участков спектра рабочих частот $\Delta F_{\Pi}(d)$ или частот $F_{\Pi}(d)$. Среду распространения радиосигнала можно описать как

$$\delta = [P_{\text{yc}}(d, f_k, C), \Delta F_{\Pi}(d), F_{\Pi}(d)]. \quad (14)$$

Надёжность СРР зависит от условий распространения (дальность трассы, подстилающая поверхность, препятствия, космические

шумы, активность ионосферы и др.), определяющих возможность доставки радиосигнала в радиоприёмную подсистему и обеспечение синхронизма, и характеризуется коэффициентом готовности канала распространения радиосигнала

$$K_{\Gamma}^{\text{СРР}} = K_{\Gamma}^{\text{РРБ}} \cdot W_{\text{синх}}, \quad (15)$$

где $K_{\Gamma}^{\text{РРБ}}$ — коэффициент готовности среды к распространению радиоволн, характеризующий возможность доставки радиосигнала от передающей к принимающей сторонам с требуемым качеством; $W_{\text{синх}}$ — вероятность синхронизации абонентов, использующих режим ППРЧ и ФМШПС, в заданных условиях распространения радиоволн.

Коэффициент $K_{\Gamma}^{\text{РРБ}}$ определяется вероятностью того, что уровень сигнала в точке приёма P_C превысит некоторое требуемое значение P_{min} , обеспечивающее устойчивый приём сигнала,

$$K_{\Gamma}^{\text{РРБ}} = W(P_C \geq P_{\text{min}}). \quad (16)$$

Обнаружение сигнала считается состоявшимся, если через время T ($T = n l T_h$ — при межсимвольной ППРЧ, $T = l T_h$ — при внутрисимвольной ППРЧ) выходное напряжение обнаружителя $z(t)$ превысит пороговый уровень z_0 . Вероятность синхронизма при действии аддитивной смеси сигнала и помехи в виде белого гауссовского шума (БГШ)

$$W_{\text{синх}} = W(z_H \geq z_0) = \int_C^{\infty} p_S(z_H) dz_H = Q_l \left[\sqrt{\lambda_S}, \sqrt{C} \right] \quad (17)$$

где z_H — нормированная переменная; z_0 — пороговый уровень; $C = z_0 / \sigma_{\text{ш}}^2$ — нормированный порог;

$$p_S(z_H) = \frac{1}{2} \left(\frac{z_H}{\lambda_S} \right)^{(l-1)/2} \exp \left(-\frac{z_H + \lambda_S}{2} \right) I_{l-1} \left(\sqrt{z_H \lambda_S} \right) —$$

плотность распределения вероятности выходного напряжения; $\lambda_S = 2 l P_S / \sigma_{\text{ш}}^2$ — параметр нецентральности; P_S — средняя мощность

принятого сигнала; $\sigma_{\text{ш}}^2$ — дисперсия БГШ; $I_{l-1}(x)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода порядка $(l-1)$; $Q[\sqrt{\lambda_s}, \sqrt{C}]$ — обобщённая Q -функция Маркума [3].

Алгоритмы вхождения в синхронизм сигналов с ППРЧ, схемы удержания синхронизма и возможные варианты их реализации рассматриваются в работе, влияние эффекта Доплера на приём фазоманипулированных широкополосных сигналов в канале синхронизации, учёт трансформации временного масштаба сигнала рассмотрены в монографии [4].

На четвёртом этапе с помощью (9) и рис. 1 с учетом возможной организации противодействия [2, 9] вычисляем значения вероятности безотказной работы элементов БКСС

$$P_{\text{БР}}(t_c) = \prod_{i=1}^N P_{\text{БР}i}(t_c) = P_{\text{БР смв}} \cdot P_{\text{БР мум}} \cdot P_{\text{БР мкд}} \cdot P_{\text{БР мкр}} \times P_{\text{БР шцмс}} \cdot P_{\text{БР мкю}} \cdot P_{\text{БР скс}} \cdot P_{\text{БР ат-21}} \times P_{\text{БР вип}} \cdot P_{\text{БР афс}} \quad (18)$$

где $P_{\text{БР}i}(t_c)$ — вероятность безотказной работы

i -го элемента БКСС.

Разработана имитационная модель функционирования БКСС в условиях воздействия помех (рис. 2), отражающая соответствующие этапы процесса передачи данных в БКСС.

При воздействии гауссовского шума $n(t)$, обусловленного шумовой помехой и собственными шумами приёмника, а также узкополосной помехи $J_i(t) = A_{ji}(t) \cos[\omega_i t + \varphi_i(t)]$ ($i=1,2$), условная вероятность ошибки на бит определяется как

$$P_E = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ Q\left(\frac{A_{j2}}{\sqrt{P_1+P_2}}, \frac{D_1(x)}{\sqrt{P_1+P_2}}\right) + Q\left(\frac{A_{j1}}{\sqrt{P_1+P_2}}, \frac{D_2(x)}{\sqrt{P_1+P_2}}\right) \right\} dx - \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{P_1}{P_1+P_2} \exp\left(\frac{A_{j2}^2 + D_1^2(x)}{2(P_1+P_2)}\right) I_0\left(\frac{A_{j2}D_1(x)}{P_1+P_2}\right) + \frac{P_2}{P_1+P_2} \exp\left(\frac{A_{j1}^2 + D_2^2(x)}{2(P_1+P_2)}\right) I_0\left(\frac{A_{j1}D_2(x)}{P_1+P_2}\right) \right\} dx, \quad (19)$$

где $D_i(x) = [A^2 + A_{ji}^2 + 2AA_{ji} \cos x]^{1/2}$;



Рис. 2. Структурная схема модели функционирования БКСС в условиях помех

$Q(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} q(\alpha, x) dx$ — функция Маркума;

P_1, P_2 — мощности помех на входе полосового фильтра демодулятора;

$q(\alpha, x) = x \exp\left[-\frac{\alpha^2 + x^2}{2}\right] I_0(\alpha x)$ — функция Райса;

$I_0(\alpha x)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка [3].

При M -ичной ЧМн, $M = 2^k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) максимальная средняя вероятность ошибки на бит в условиях воздействия наихудшей шумовой помехи в части полосы ($\gamma = \gamma_{\text{opt}}$) имеет вид

$$P_{E \text{ max}} \approx \begin{cases} \frac{\beta G_j}{E_s}, \rho \leq \frac{E_s}{G_j}, \gamma = \gamma_{\text{opt}}, \\ \frac{M}{4} \exp\left[-\frac{k E_s}{2 G_j}\right], \rho > \frac{E_s}{G_j}, \gamma = 1, \end{cases} \quad (20)$$

где E_s — энергия сигнала на бит; G_j — спектральная плотность мощности (СПМ) помехи; γ — коэффициент, определяющий часть полосы сигнала с ППРЧ, занимаемой помехой; $0 \leq \rho \leq 1$ — коэффициент перекрытия, характеризующий часть частотного элемента, поражённую помехой; $\beta = E_s P_j / G_0 P_s$; P_j — мощность помехи; G_0 — СПМ собственных шумов.

Если шумовая помеха является сосредоточенным по полосе БГШ, то при $\rho = 1$ средняя вероятность ошибки на бит для БКСС с ППРЧ и двоичной ЧМн при действии шумовой помехи на основной канал

$$P_{E \text{ осн}} = \frac{1}{2 + \beta} \exp\left[-\left(\frac{2G_0}{E_s} + \frac{P_j}{P_s}\right)^{-1}\right], \quad (21)$$

при действии шумовой помехи на дополнительный канал

$$P_{E \text{ доп}} = \frac{1 + \beta}{2 + \beta} \exp\left[-\left(\frac{2G_0}{E_s} + \frac{P_j}{P_s}\right)^{-1}\right], \quad (22)$$

при действии шумовых помех, одинаковой мощности, на основной и дополнительный каналы

$$P_{E(2)} = \frac{1}{2} \exp\left[-\left(\frac{2G_0}{E_s} + \frac{P_j}{P_s}\right)^{-1}\right]. \quad (23)$$

Вероятность ошибки на бит для бинарного ФМШПС в условиях воздействия аддитивного БГШ с двусторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$ определяется выражением

$$P_E = Q\left[\sqrt{2E_b/N_0}\right], \quad (24)$$

где E_b — энергия сигнала на бит;

$$Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt \quad [4].$$

Вероятность ошибки на бит для бинарного ФМШПС в условиях воздействия БГШ и помехи в части полосы $J(t)$ имеет вид

$$P_E = Q\left[\left((N_0/2E_b) + (\eta P_j/2K_s P_s)\right)^{-1/2}\right], \quad (25)$$

где $K_s = T_b/\tau_c = W_s/F_s$ — коэффициент расширения спектра; W_s — расширенная полоса частот сигнала; F_s — полоса частот информационного бита; τ_c, T_b — длительности чипа и бита; P_s и P_j — мощности сигнала и помехи; η — параметр воздействия помехи [4].

Вероятность ошибки на символ при приёме QPSK-сигнала определяется выражением

$$P_{\text{QPSK}} = 2Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right) \cdot \left[1 - \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)\right]^2, \quad (26)$$

где $2E_b/N_0$ — отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе согласованного фильтра;

$Q(\beta) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{\beta}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$ — интеграл ошибок.

Результаты моделирования вероятностей искажения символов и битов, передаваемых SEFDM-сигналом с QPSK на фоне аддитивного БГШ, приведены в работе [10].

Время запаздывания передачи команд и данных определяется как

$$T_{\text{зАд}} = \frac{D_{\text{мес}}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{\text{max}} C}{cD_{\text{мес}}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{\text{max}} C}{cD_{\text{мес}}} \right], \quad (7)$$

где $D_{\text{мес}}$ — длина пакета (сообщений), [бит]; C — пропускная способность канала, [бит/с]; Λ — общая интенсивность исходящего трафика в канале, [бит/с]; d_{max} — максимальный радиус в сети; K — задержка повторной передачи, выраженная в количестве окон; $c = 3 \cdot 10^8$ — скорость распространения электромагнитных волн; S — среднее количество успешных передач пакетов на окно, приходящееся на всех абонентов [11].

На пятом этапе в зависимости от надёжности элементов БКСС по (12) вычисляем

$$T_{\text{ср_НО}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_{\text{НО } i}}}, \quad (28)$$

где $T_{\text{НО } i}$ — время наработки на отказ i -го элемента РК БКСС (рис. 1).

Учитывая выражения (5), (13) и (28), получаем

$$K_{\text{П}} = \sum_{i=1}^N \frac{T_{\text{В } i}}{T_{\text{НО } i} + T_{\text{В } i}} = \frac{T_{\text{В_сМВ}}}{T_{\text{НО_сМВ}} + T_{\text{В_сМВ}}} + \frac{T_{\text{В_мУМ}}}{T_{\text{НО_мУМ}} + T_{\text{В_мУМ}}} + \dots + \frac{T_{\text{В_аФс}}}{T_{\text{НО_аФс}} + T_{\text{В_аФс}}} + (1 - K_{\Gamma}^{\text{СРР}}) \quad (29)$$

На шестом этапе на основании выражений (13), (19) и (29) определяем

$$K_{\text{ОГ}} = K_{\Gamma} \cdot P(t_{\text{с}}) = (1 - K_{\text{П}}) \cdot P(t_{\text{с}}). \quad (30)$$

Рассчитанные с помощью выражений (13), (19), (28), (29) и (30) показатели надёжности радиоканала БКСС (коэффициента простоя $K_{\text{П}}$, вероятность безотказной работы $P_{\text{БР}}(t_{\text{с}})$ в течение времени $t_{\text{с}}$, среднего времени наработки на отказ $T_{\text{ср_НО}}$, времени восстановления $T_{\text{В}}^{\text{доп}}$, коэффициента оперативной готовности $K_{\text{ОГ}}$) сравниваются с требованиями по надёжности, обоснованными и сформированными на основании выражений (5), (6), (9)–(12). Надёжность радиосвязи в диапазонах волн 160, 460 (стандарт TETRA) и 900 МГц (стандарт

GSM-R) по месту и времени должна быть не ниже 0,95 [6].

Как показывает практика эксплуатации БКСС, цифровых КСС, требования по надёжности во многих случаях не могут быть удовлетворены при построении комплексов без резервирования элементов. Различные виды резервирования (структурное, функциональное, нагрузочное) [1] следует проводить до достижения заданных (требуемых) показателей надёжности элементов БКСС. Мощным резервом являются мероприятия по обновлению схемы войскового ремонта (ВР) [7], а также современные подходы к организации ТО и Р на всех стадиях эксплуатации перспективных БКСС.

Предложенные в работе методический подход к формированию требований и методика обеспечения показателей надёжности БКСС, использующего сигналы с ППРЧ и ФМШПС, базируются на использовании допустимых значений коэффициента простоя, вероятности безотказной работы, среднего времени наработки на отказ, времени восстановления и коэффициента оперативной готовности. Для обеспечения заданной надёжности БКСС необходимо учитывать затраты на резервирование, а также массогабаритные и стоимостные ограничения. Структурная схема БКСС, с помощью которой обеспечиваются заданные показатели надёжности, будет определять окончательный этап (вариант) построения цифрового перспективного БКСС.

Литература

1. Бортовые радиоэлектронные системы. Основы построения: учебное пособие / А.В. Леньшин, Н.М. Тихомиров, С.А. Попов; под ред. А.В. Леньшина. – 2 изд., перераб. и доп. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2021. 486 с.
2. Леньшин А.В. Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы: учебник. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2023. 636 с.
3. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы применения. Монография / Под ред. М.Л. Артемова. М.: Радиотехника, 2021. 556 с.

4. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопалов В.И. Помехоустойчивость систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательности. М.: РадиоСофт, 2011. 550 с.

5. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия–Телеком, 2019. 592 с.

6. Леньшин А.В., Лебедев В.В. Методологические аспекты оценки надёжности авиационных систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Телекоммуникации. 2020. №4. С. 8–15.

7. Леньшин А.В., Железняков А.О., Сидорчук В.П. Оценка эффективности системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования авиационной техники при эксплуатации // Актуальные проблемы развития вооружения и военной авиационной техники (вертолетов): сборник материалов II Международной ВНК, посвященной памяти конструкторов вертолетов

М.Л. Миля и Н.И. Камова. Киров: Изд-во МЦИТО, 2022. С. 124–130.

8. Аджемов А.С., Санников В.Г. Общая теория связи. Учебник для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2021. 624 с.

9. Леньшин А.В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. Воронеж: Научная книга, 2014. 590 с.

10. Леньшин А.В., Шаталов Е.В. Помехоустойчивость приема спектрально эффективных сигналов с неортогональным частотным уплотнением // Телекоммуникации. 2021. № 7. С. 18–25.

11. Иванов М.С., Понаморов А.В., Макаренко С.И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104–139.

Поступила 1 февраля 2023 г.

English

METHODOLOGY FOR ENSURING RELIABILITY INDICATORS OF A PROMISING ON-BOARD COMMUNICATIONS COMPLEX

Andrey Valentinovich Lenshin — Grand Dr. in Engineering, Professor of Department of Aviation Radio-electronic Complexes, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy¹ named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Evgeniy Vladimirovich Shatalov — PhD, Head of the Traffic Police Department of the Main Directorate of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation in the Voronezh region².

E-mail: evgen1778@mail.ru

¹Address: 394064, Russian Federation, Voronezh, Starykh Bolshevikov str., 54 a.

²Address: 394038, Russian Federation, Voronezh, Holmistaya str., 56.

Abstract: A methodological approach to the formation (justification) of requirements and a methodology for ensuring the reliability of the radio channel of a promising on-board communications complex using signals with pseudorandom adjustment of the operating frequency and phase-manipulated broadband signals are proposed, against the background of a significant increase in the intensity of aviation use and an increase in the requirements for the timeliness and reliability of the transmission of dynamically changing heterogeneous information on board an aircraft in real time. The methodology is based on the use of acceptable values of the downtime coefficient, the probability of failure-free operation and the operational readiness coefficient. A simulation model of the functioning of the on-board communication complex under the influence of interference has been developed, reflecting the corresponding stages of the data transmission process in the complex. It is shown that various types of redundancy (structural, functional, load) should be carried out until the specified (required) reliability indicators of the elements (blocks) of the on-board communications complex are reached.

Keywords: on-board communications complex, radio communication channel, radio channel reliability, operational readiness coefficient, probability of trouble-free operation.

References

1. On-board electronic systems. Fundamentals of construction: textbook. A.V. Lenshin, N.M. Tikhomirov, S.A. Popov; edited by A.V. Lenshin. 2nd ed., reprint. and add. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2021. 486 p.

2. *Lenshin A.V.* Airborne electronic warfare systems: textbook. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2023. 636 p.
3. Automated control systems, radio communications and electronic warfare. Fundamentals of theory and principles of application. Monograph. Edited by *M.L. Artemov*. Moscow: Raditehnika, 2021. 556 p.
4. *Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Shestopalov V.I.* Noise immunity of radio communication systems with spectrum expansion by direct modulation of pseudorandom sequence. Moscow: RadioSoft, 2011. 550 p.
5. *Galkin V.A.* Digital mobile radio communication. Textbook for universities. 2nd ed., reprint. and add. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom, 2019. 592 p.
6. *Lenshin A.V., Lebedev V.V.* Methodological aspects of assessing the reliability of aviation radio communication systems with pseudorandom adjustment of the operating frequency. *Telekommunikacii*. 2020. No. 4. Pp. 8–15.
7. *Lenshin A.V., Zheleznyakov A.O., Sidorchuk V.P.* Evaluation of the effectiveness of the system of technical maintenance and repair of radio-electronic equipment of aviation equipment during operation. Actual problems of the development of weapons and military aviation equipment (helicopters): collection of materials of the II International VNK dedicated to the memory of helicopter designers M.L. Mil and N.I. Kamov. Kirov: MCITO Publishing House, 2022. Pp. 124–130.
8. *Ajemov A.S., Sannikov V.G.* General theory of communication. Textbook for universities. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom, 2021. 624 p.
9. *Lenshin A.V.* On-board systems and electronic suppression complexes. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2014. 590 p.
10. *Lenshin A.V., Shatalov E.V.* Noise immunity of receiving spectrally effective signals with non-orthogonal frequency compaction. *Telekommunikacii*. 2021. No. 7. Pp. 18–25.
11. *Ivanov M.S., Ponamarev A.V., Makarenko S.I.* Methodology for increasing the data transmission rate in the aerial radio communication network of aircraft control due to adaptive distribution of the network frequency-time resource taking into account the intensity of the transmitted traffic. *Systems of Control, Communication and Security*. 2022. No. 1. Pp. 104–139.