

УДК 621.317

Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля

Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В.

Постановка задачи: в статье осуществляется математическая постановка и решение научной задачи в части касающейся обеспечения своевременности функционального контроля средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра, позволяющей повысить их коэффициент готовности, за счет своевременного обнаружения параметрических отказов в условиях перехода к стратегии технического обслуживания по состоянию, производится ее декомпозиция на частные задачи. **Цель работы** заключается в определении и обосновании пути решения научной задачи, за счет перехода от параметрического контроля к контролю качества функционирования средств радиосвязи, что позволяет повысить их коэффициент готовности, благодаря своевременному обнаружению параметрических отказов в условиях перехода к стратегии технического обслуживания по состоянию. **Используемые методы:** теоретической и методологической основой для постановки научной задачи исследования явились фундаментальные основы и математический аппарат теорий надежности, технической диагностики, систем и системного анализа, теории электрической связи. **Новизна:** в учете диагностического аспекта надежности средств радиосвязи при постановке и решении математической задачи исследования, а также вероятности безотказной работы средства контроля. **Результат:** осуществлена постановка и решение научной задачи исследования по повышению коэффициента готовности средств радиосвязи, определены существенные факторы, ограничения и допущения. **Теоретическая значимость** полученных результатов состоит в развитии радиоволнового метода неразрушающего контроля применительно к функциональному контролю средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра, а также в дальнейшем развитии научно-методического аппарата контроля и диагностирования, учитывающего влияние длительности и периодичности функционального контроля радиосредств, в системе, образованной средством и объектом контроля, с ограниченным ресурсом входящих в нее подсистем.

Ключевые слова: автоматизированный радиоцентр, надежность, параметрический отказ, средства радиосвязи, техническое обслуживание, функциональный контроль.

Актуальность

Вероятностно-временные характеристики по доведению сигналов и команд как в действующих, так и в перспективных радиолиниях (РЛ) не могут быть обеспечены без эффективного управления техническим состоянием (ТС) средств радиосвязи (СРС) автоматизированного радиоцентра (АРЦ), что, в свою очередь, зависит от своевременной идентификации вида ТС (правильности функционирования [1]) радиосредств. Следовательно, требуется раз-

Библиографическая ссылка на статью:

Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В. Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 204-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227

Reference for citation:

Budko P. A., Golyunov M. V., Allakin V. V. Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 204-227 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227

работка рациональных методов и средств, обеспечивающих достоверную оценку фактического состояния СРС АРЦ, прогнозирование его изменения и оперативный поиск возможных дефектов, что составляет предмет исследования технической диагностики (ТД) [2]. Задачами ТД являются:

- контроль технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния [3].

Проведенный анализ методов контроля технического состояния (КТС) радиосредств показал целесообразность разработки методики функционального контроля (ФК) СРС АРЦ, позволяющей своевременно идентифицировать техническое состояние приемо-передающих радиосредств и не допустить состояний их неправильного функционирования, что особенно важно для территориально распределенной сети радиосвязи, в которой одновременно функционирует множество передающих (РПДУ) и приемных устройств (РПУ). Встроенные средства контроля (СК) предназначены для выявления «грубых» функциональных отказов в непрерывном режиме по ограниченному числу контролируемых параметров благодаря применению тестовых методов контроля уровней сигналов (наличие, отсутствие), а контроль параметров СРС, непосредственно определяющих качество формируемого сигнала [4] и обработку в приемном тракте осуществляют через определенный межконтрольный интервал с привлечением инженерно-технического состава и средств измерений. Так, при завышенном межконтрольном интервале возрастает вероятность возникновения постепенных (параметрических) отказов [5], что приводит к появлению интервалов времени, в течение которых средства радиосвязи могут функционировать в состоянии скрытого параметрического отказа, что в свою очередь приводит к снижению эффективности функционирования радиолинии сети радиосвязи, а при необоснованно сокращенном межконтрольном интервале увеличивается время отрыва радиосредств от выполнения целевых задач и возрастают затраты на ее эксплуатацию [6].

Кроме того, определяемый, согласно теории надежности, коэффициент готовности объектов (систем – СРС) не учитывает интервал времени неправильного функционирования, т. е. он определен для случая идеального диагностического обеспечения (межконтрольный интервал равен нулю), что не соответствует действительности.

Таким образом, имеют место противоречия:

- *в теории* – между научно-методическим аппаратом теории надежности, согласно которого определение расчетного значения коэффициента готовности объекта контроля (ОК – радиосредств) осуществляется без учета интервала времени неправильного функционирования (при идеальном диагностическом обеспечении, без учета диагностического аспекта надежности) с одной стороны и отсутствием методики функционального контроля СРС АРЦ, позволяющей обеспечить своевременный КТС радиосредств с другой;

- *в практике* – между интервалами инструментального КТС радиосредств, превышающими их среднюю наработку на отказ, плано-предупредительной стратегией технического обслуживания (ТО), отсутствием

критерия на управление ТС СРС и необходимостью перехода к стратегии технического обслуживания по состоянию (ТОС), осуществления индивидуального прогноза ТС, благодаря своевременной и достоверной идентификации вида технического состояния (правильности функционирования) СРС АРЦ.

Виды технических состояний средств радиосвязи в процессе эксплуатации

Согласно ГОСТ 27.002-2015 [7] *работоспособное состояние* – состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям, установленным в документации на этот объект. Соответственно *неработоспособное состояние* – состояние, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект.

Совокупность параметров работоспособности может быть представлена n -мерным вектором $G(n)$, с областью допустимых значений $G(n)_{\text{доп}}$. Тогда условие работоспособного состояния $G(n) \subset G(n)_{\text{доп}}$. Для выполнения этого условия каждый из параметров, принадлежащих совокупности $G(n)$ должен находиться в пределах $n_{\text{ин}} < n_i < n_{\text{ив}}$, где $n_{\text{ин}}, n_{\text{ив}}$ – допустимые соответственно верхние и нижние значения i -го параметра [8].

Параметры радиосредств (системы) подразделяются на четыре группы:

- параметры функционального использования (ПФИ);
- технические параметры (ТП);
- параметры технической эксплуатации (ПТЭ);
- системные параметры (СП).

Параметры функционального использования характеризуют средства радиосвязи с точки зрения их потребительской сущности. Технические параметры радиосредств определяются инженерными решениями, реализуемыми на стадиях исследования, проектирования и изготовления. Их количественные значения, в конечном счете, влияют на ПФИ на стадии эксплуатации. В свою очередь определяющие ТП системы зависят от множества параметров элементов системы. При статистическом моделировании параметрической надежности системы [9] искомые характеристики определяются по результатам статистической обработки множества значений определяющих параметров системы, рассчитанных по множествам возможных значений параметров ее элементов. В совокупности ТП характеризуют систему (СРС), а каждый из параметров в отдельности является основным показателем одного или нескольких устройств, входящих в систему. Допуски на ТП определяются на стадии проектирования системы.

Параметры технической эксплуатации характеризуют СРС как объект технической эксплуатации, под которым понимают изделие техники, обладающее потребностью в выполнении определенных операций ТО и ремонта (ТО и Р) и приспособленностью к выполнению этих операций.

К группе ПТЭ, прежде всего, необходимо отнести параметры свойств надежности:

- безотказности;
- долговечности;
- сохраняемости;
- ремонтпригодности.

Системные параметры позволяют представить СРС как техническую систему, состоящую из отдельных радиоэлектронных устройств, связей, и имеющих общую целевую функцию, сложную структуру, а также другие системные характеристики.

Параметры технической эксплуатации связаны между собой и с параметрами ПФИ и ТП. Они, по существу, представляют перекрывающиеся нечеткие множества [10]. Установление зависимостей ПФИ от ТП радиосредств представляет собой диагностическую модель.

В процессе эксплуатации деградационные процессы приводят к дефектам, в результате совокупный параметр, характеризуемый вектором $G(n)$, меняется во времени: $G(n) = \text{var}$. Если параметр выходит из множества своих допустимых значений: $G(n) < G(n)_н$ или $G(n) > G(n)_в$, то в системе нарушается работоспособное состояние, и она переходит в неработоспособное состояние.

Согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 27.002-2015 *отказ* – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния, и может быть внезапным, постепенным, явным, скрытым и т. д. Особое внимание необходимо обратить на постепенные скрытые отказы, возникающие в процессе эксплуатации радиосредств из-за отклонений (дрейфа) параметров за пределы допусков для выявления которых требуется разработка средств контроля ТС. Для обнаружения этого типа отказов, устранения разрегулировок в настоящее время проводятся годовые технические обслуживания (ТО-2) (планово-предупредительная система ТО) с привлечением инженерно-технического состава и средств измерений. *Мониторинг* ТС: составная часть ТО, заключающаяся в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг может проводиться в процессе работы объекта непрерывно или через запланированные интервалы времени. На основе данных мониторинга осуществляется контроль ТС и остаточного ресурса объекта [7].

Совокупность признаков, которые позволяют сделать вывод о том, произошел отказ или нет, называют критерием отказа [11]. *Критерий отказа* – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации. Определение подмножества наиболее важных требований – это и есть задание критерия отказа. Выбор критерия отказа, в том числе имеет субъективный характер по вышеуказанным причинам (взаимосвязь ПФИ и ТП). После того, как такой критерий определен, регистрацию перехода из работоспособного в неработоспособное состояние можно проводить уже вполне объективно (рис. 1).

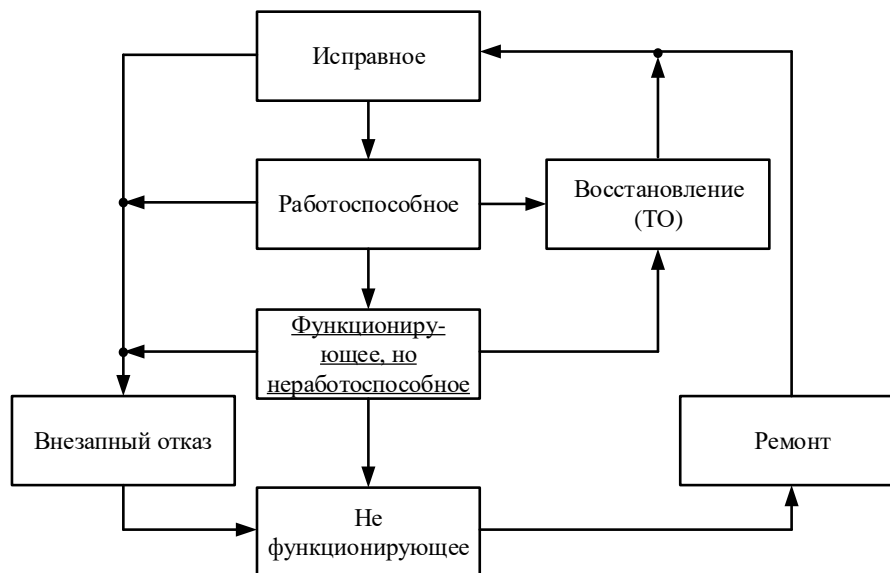


Рис. 1. Граф перехода системы из одного состояния в другое

Представленный на рис. 1 граф отображает марковскую модель перехода системы из одного состояния в другое при идеальном и неидеальном контроле [12]. В марковской модели надежности принимаются следующие допущения:

- интенсивности отказов элементов постоянны и равны λ ;
- промежутки времени восстановления работоспособности отказавшего элемента распределены по экспоненциальному закону с параметром μ ;
- отказы различных элементов являются независимыми событиями;
- в системе существует контроль работоспособности, позволяющий обнаруживать отказы любых элементов практически в момент их возникновения (идеальный контроль, рис. 2 (а));
- во время восстановления в отказавшем элементе новых отказов не происходит.

При неидеальном контроле (рис. 2 (б)) в системе могут быть скрытые отказы, в этом случае возможно функционирующее, но неработоспособное состояние системы [8].

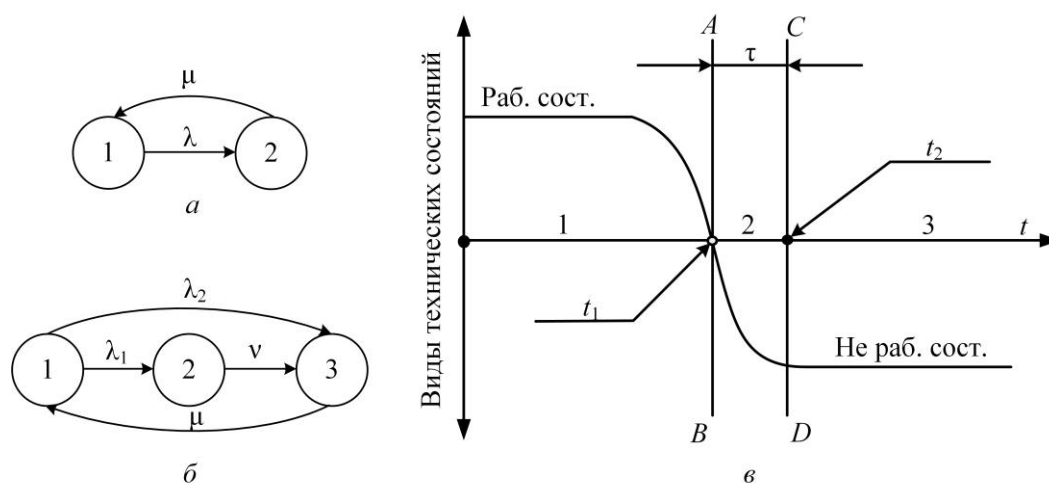


Рис. 2. Графы состояний системы при идеальном (а) и неидеальном контроле (б) и рисунок, их поясняющий (в)

На рис. 2 (в) используются следующие обозначения:

- t_1 – время (событие) наступление отказа;
- t_2 – время распознавания того факта, что наступил отказ (зависит от диагностического обеспечения), при идеальном контроле равно нулю;
- τ – интервал времени неправильного функционирования;
- V – параметр экспоненциального распределения времени обнаружения скрытых отказов;
- $T_3 = 1/V$ – средняя задержка обнаружения скрытого отказа). При этом значение T_3 может быть значительно больше времени восстановления системы.

Необходимо отметить, что СРС являются аналого-цифровыми системами, в которых опорный генератор, выходные цепи формирователей сигналов, блоки фильтрации, усилитель мощности и входные цепи РПУ остаются аналоговыми, ТС которых определяет качество функционирования радиолинии в целом.

Для контроля параметров РПДУ (РПУ) в соответствии ГОСТ Р 51903-2002 (ГОСТ Р 52016-2003) необходимы сложные измерительные приборы: анализатор спектра, частотомер, измеритель уровня, генератор высокочастотного сигнала и т. д., что для ФК избыточно и будет снижать общую надежность системы. Кроме того, даже зная с высокой точностью все параметры сигнала, возникает вопрос о его качестве, как целевой функции для функционирования системы и РЛ в целом.

Таким образом, необходим дополнительный (к имеющимся встроенным средствам контроля) контур КТС СРС, своевременно определяющий при своём функционировании их комплексный показатель ТС, который с одной стороны представлял собой функцию от параметров аппаратуры (аппаратурный уровень), а с другой являлся переменной в уравнениях показателей вышестоящего канального уровня.

Постановка научной задачи

Необходимость полноты учета данных о фактическом техническом состоянии обслуживаемых СРС следует из определения надежности [13, 14]. Общая надежность радиотехнической системы определяется двумя вероятностями:

- 1) вероятностью нахождения выходного параметра системы (одного или нескольких) в зоне допуска во время нормального функционирования $P_{ок}^*$;
- 2) вероятностью безотказной работы элементов системы $P_{ок}$.

Теория надежности оперирует статистикой отказов элементов системы (восстанавливаемых, невосстанавливаемых), интенсивность которых в период нормальной эксплуатации стремится к некоторому постоянному значению $\Lambda_b = const$, определяемому уровнем безотказности техники связи (схемно-конструкционное построение), реализованному в процессе разработки и произ-

водства. Значение $\Lambda_b = \text{const}$ соответствует экспоненциальному закону распределения вероятности безотказной работы [15].

Анализ ресурсных характеристик элементов, используемых в технике связи показал, что плотность вероятности распределения значений их ресурса в общей совокупности подчиняется нормальному закону. Кроме того, опыт эксплуатации свидетельствует, что время безотказной работы конкретных элементов, определяемое постепенными изменениями параметров за счет процессов изнашивания и старения, в целом определяется нормальным законом распределения. Тогда интенсивность суммарного потока отказов элементов в каждый момент времени определяется как $\Lambda_\Sigma = \Lambda_b + \Lambda_n(t)$, где $\Lambda_n(t)$ – интенсивность возникновения постепенных дефектов элементов, израсходовавших свой ресурс [16].

В этом случае для подтверждения численных значений показателей, полученных в рамках теории надежности, при эксплуатации средств связи необходимо идеальное диагностическое обеспечение, которое в режиме реального времени способно определять ТС средств (систем) связи.

В настоящее время при эксплуатации СРС в режиме реального времени встроенные средства контроля способны выявлять только отказы функционирования, которые могут возникать при скачкообразном изменении выходных параметров или быть следствием давно возникшего параметрического [5, 12] (постепенного) отказа, своевременно не распознанного средствами КТС. При параметрическом отказе радиотехническая система способна функционировать до момента проведения инструментального ТО, либо до момента наступления функционального отказа.

Для обеспечения общей надежности радиосредств необходимо совмещение по времени и месту систем функционального Λ_b и параметрического контроля $\Lambda_n(t)$. Но если средства ФК обычно являются неотъемлемой частью СРС и осуществляют мониторинг их работоспособности в режиме реального времени, то средства параметрического контроля – внешние аппаратно-программные измерительные средства в виде автоматизированных средств контроля (АСК). Причем сложность этих средств сопоставима со сложностью ОК, т. е. СРС, а может и превосходить их. Анализ опыта создания автоматизированных средств диагностирования показывает, что средства диагностирования эффективны, если количество их элементов не превышает 10-15 % [11] (15-20 % [12]) от количества элементов объектов, обслуживаемых с помощью данного средства диагностирования.

Из этого следует необходимость перехода от непрерывного к дискретному контролю параметров целевой функции радиотехнической системы для обеспечения вероятности безотказной работы СК $P_{ск}$ не ниже заданной в течение установленного срока службы, например, за счет уменьшения наработки [5, 12]. В данном случае возникает противоречие между необходимостью непрерывного параметрического контроля ОК и ограниченным ресурсом СК. Непрерывный контроль порождает «цепную реакцию контроля» («кто сторожит сторожей?») [12]), когда для контроля СК необходимо другое СК. И раз-

решается это противоречие только заменой непрерывного контроля ТС СРС на дискретный [17].

Из дискретности параметрического контроля следует, что с одной стороны СК (средство измерений) расходует свой ресурс порциями с периодичностью τ в течение времени контроля Δt_k^* , а с другой стороны существует вероятность возникновения интервалов времени τ , в течение которых СРС может функционировать неправильно.

Вероятность $P_{ок}^*$ представляет собой вероятность безотказной работы ОК в смысле его ненахождения в состоянии нераспознанного (скрытого) параметрического отказа и поэтому является функцией $P_{ок}^*(\tau)$. Поскольку СК для ОК – вышестоящая система, то должно выполняться условие

$$P_{ск}(\tau) \geq P_{ок}^*(\tau), \quad (1)$$

Неравенство (1) означает, что надежность СК (в виде вероятности безотказной работы СК) должна быть больше или равна надежности контролируемой системы в виде вероятности $P_{ок}^*(\tau)$ [18]. Нахождение интервала времени между процедурами параметрического контроля СРС в виде $\tau = \arg \max P_{ок}^*(\tau)$, при условии (1), позволит снизить вероятность нахождения ОК в состоянии скрытого (нераспознанного) параметрического отказа и максимизировать коэффициент готовности объекта контроля $K_r(\tau)$ [19]. Необходимо отметить, что $K_r(\tau) = P_{ок}^*(\tau)$, при $T_b = 0$ (ч) или $\tau \gg T_b$, где T_b – время восстановления ОК, что, например, будет соблюдаться для резервируемых систем и в общем случае $P_{ок}^*(\tau) > K_r(\tau)$. Следовательно, при максимизации $P_{ок}^*(\tau)$ будет осуществляться максимизация и коэффициента готовности ОК, что равнозначно минимизации влияния на него не идеальности функционального контроля.

Из вышеизложенного следует, что научная задача заключается в разработке методики (M) обеспечения своевременности ($Q, K_{ок}$) функционального контроля (Z, Y, G) средств радиосвязи (S) АРЦ, позволяющей повысить их коэффициент готовности $K_r(\tau)$ в условиях перехода к стратегии технического обслуживания по состоянию на основе метода оптимальной фильтрации дискретных сигналов и квалиметрических методов определения уровня качества технических систем.

Формальная постановка научной задачи [20] имеет вид:

$$M : \langle S, Z, Y, G, Q, K_{ок} \rangle \rightarrow \max_{\tau \gg T_b} K_r(\tau) \left\{ \begin{array}{l} \tau = \arg \{ \max P_{ок}^*(\tau) \}, \\ G \subseteq G_{доп}, Z \subseteq Z_{доп}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $S = \{s, s^*\}$ – множество средств радиосвязи (объект исследования) АРЦ, в виде подмножеств передающих $\{s_1, s_2, \dots\}$ и приемных $\{s_1^*, s_2^*, \dots\}$ радиосредств; $Z = \{z_1, z_2, \dots\}$ – множество технических (внутренних) параметров СРС (РПДУ, РПУ); $Y = \{y_1, y_2, \dots\}$ – множество выходных сигналов канала связи; $Q = \{D, \tau\}$ – множество показателей контроля (предмет исследования), D, τ – достоверность

и своевременность контроля; $K_{ок} = \{P_{ок}, K_r\}$ – множество показателей надежности ОК (включая встроенные или внешние СК).

Контроль параметров радиосредств сопряжен с прекращением функционирования (инструментальный контроль) и не может проводиться часто, следовательно, сокращение времени τ возможно только за счет разработки методики ФК средств радиосвязи АРЦ [19].

Постановка задачи на моделирование

Согласно эталонной модели взаимодействия открытых систем [23], физический уровень в сети радиосвязи имеет особое значение из-за специфичных свойств среды распространения радиоволн декаметрового (ДКМ) диапазона и реализуется в РПДУ, РПУ и антенно-фидерных устройствах (АФУ) либо подсистеме (АФП), что накладывает дополнительные требования на систему контроля их ТС. Радиосредства в ДКМ радиолиниях осуществляют передачу мощных (от десятков Вт, до десятков кВт) и прием слабых (единицы мкВ) с высоким динамическим диапазоном, подверженных замираниям и воздействию противника, аналоговых сигналов. Основные цепи (от модулятора до демодулятора) передачи и приема таких сигналов остаются аналоговыми, и их техническое состояние в значительной мере определяет качество функционирования РПУ, РПДУ и РЛ в целом (рис. 3).

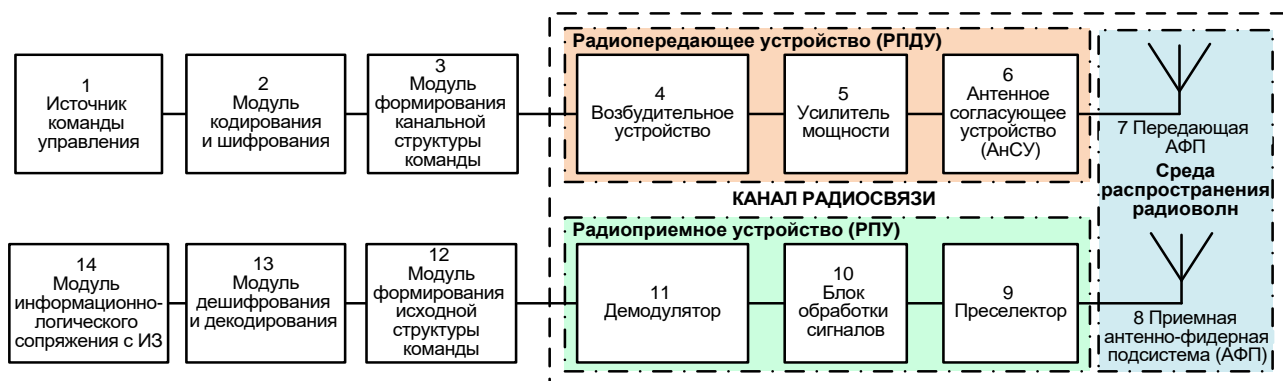


Рис. 3. Обобщенная структурная схема радиотракта РЛ АРЦ

Контроль технического состояния средств кодирования и шифрования информации (модули 2, 3, 12, 13 на рис. 3) не требуют особых пояснений, поскольку их правильность функционирования полностью определяется тестовыми методами [1].

Для идентификации ТС приемо-передающих устройств следует использовать их показатели качества функционирования (ПКФ) [4], которые необходимо детализировать до функциональных зависимостей от параметров СРС.

Задача на моделирование – разработать аналитическую модель (μ) функционального контроля СРС АРЦ (S, S_n), позволяющую установить зависимости ПКФ (G) радиосредств от их внутренних (Z) и внешних параметров (E), эффективности функционирования (Ξ) радиолинии.

Формальная постановка задачи на моделирование:

$$\mu: \langle S, S_{\text{и}}, Z, E, \Theta \rangle \rightarrow G \mid S_{\text{и}} \subseteq S_{\text{и доп}}, Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E \subseteq E_{\text{доп}}, \Theta \subseteq \Theta_{\text{доп}}, G \subseteq G_{\text{доп}};$$

где $Z_{\text{доп}}, E_{\text{доп}}, \Theta_{\text{доп}}, G_{\text{доп}}$ – допустимые значения множеств; $S_{\text{и}} = \{s_{\text{и}}\}$ – множество искаженных сигналов на выходе передающего устройства; $E = \{\bar{h}_0^2, m\}$ – множество параметров среды и условий функционирования, $\bar{h}_0^2 = (\bar{P}_c \cdot T) / v^2$ – отношение энергии сигнала на бит (символ) информации к спектральной плотности шума v^2 , m – параметр распределения Накагами; $\Theta = \{P(p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош доп}})\}$ – множество показателей эффективности функционирования радиолинии, $P(p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош доп}})$ – вероятность связи с требуемой достоверностью; $G = \{g_i^2, \beta\}$ – множество ПКФ радиосредств АРЦ, g_i^2, β – ПКФ формирователя сигналов и РПУ соответственно [22].

В работе [22] получены зависимости ПКФ от параметров приемопередающей аппаратуры, что позволяет их использовать в процессе функционального контроля СРС на АРЦ и обеспечить своевременность ФК радиосредств.

Постановка задачи на разработку методики обеспечения своевременности функционального контроля средств радиосвязи автоматизированного радицентра

В настоящее время вопросы влияния показателей диагностирования на надежность сложных технических систем в достаточной степени не проработаны [23]. В технических заданиях на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию (модернизации) сложных технических комплексов в разделе «Требования надежности», как правило, приводятся требуемые значения вероятности безотказной работы комплекса, коэффициента готовности, средней наработки на отказ, среднего времени восстановления, а в разделе «Требования к диагностическому обеспечению» – в большинстве случаев указывается требуемая глубина диагностирования, но не приводятся требуемые значения достоверности, длительности и периодичности диагностирования, которые влияют на показатели надежности сложных технических комплексов.

В литературе [2, 5, 12, 24, 25] часто упоминается о существовании связи между показателями надежности и диагностирования, приводятся достаточно логичные рассуждения, однако упоминаемых аналитических соотношений немного. Исходя из классификации систем в нерезервированных, невозстанавливаемых системах показатели безотказности, то есть показатели до первого отказа и средства контроля, только ухудшают эти показатели, так как могут отказать и сами, чем увеличивают количество отказов в системе. Знание об отказах невозможно использовать, так как нет резервирования, и отсутствует восстановление. В нерезервированных восстанавливаемых системах отказ каждого элемента приводит к отказу системы, поэтому контроль не может улучшить показатели безотказности. Показатели готовности могут улучшаться, если кон-

троль сокращает время пребывания в неработоспособном состоянии при восстановлении отказов. В резервированных системах контроль часто используется как одно из средств управления резервом. В многоуровневых и многофункциональных системах контроль при возникновении отказа, позволяет изменять режимы функционирования, проводить реконфигурацию структуры (технической, функциональной и т. д.). Контроль ТС в ряде случаев, в совокупности с системой поддержки и принятия решений в подсистеме управления ТС, позволяет повысить надежность. Так как система КТС может являться также и источником отказов, то моделировать её необходимо с включением в «надежностную» модель [1]. Таким образом, имеется принципиальная связь и взаимное влияние показателей надежности СРС, с одной стороны, и характеристик КТС с другой [1, 17].

Целью разрабатываемой методики является обеспечение своевременности функционального контроля средств радиосвязи АРЦ, позволяющей повысить их коэффициент готовности в условиях перехода к стратегии технического обслуживания по состоянию [19].

Исходными данными для методики являются: наличие СРС АРЦ в виде совокупности однотипных радиоприемных и радиопередающих устройств, включая резервные комплекты, их тактико-технические и надежность характеристики, требуемое значение коэффициента готовности $K_{г\text{треб}}$ СРС, перечень контролируемых параметров и среднее время T^* (априорная статистическая величина) выхода их значений за пределы допусков.

Выходные данные: информация, с требуемой достоверностью, о техническом состоянии СРС $\Delta\beta_i$, $K_{шл}$ (РПУ), g_i^2 (РПДУ), обеспечение своевременности КТС радиосредств τ , повышение $K_r(\tau)$.

Для решения поставленной задачи методику ФК средств радиосвязи АРЦ целесообразно разбить на следующие этапы:

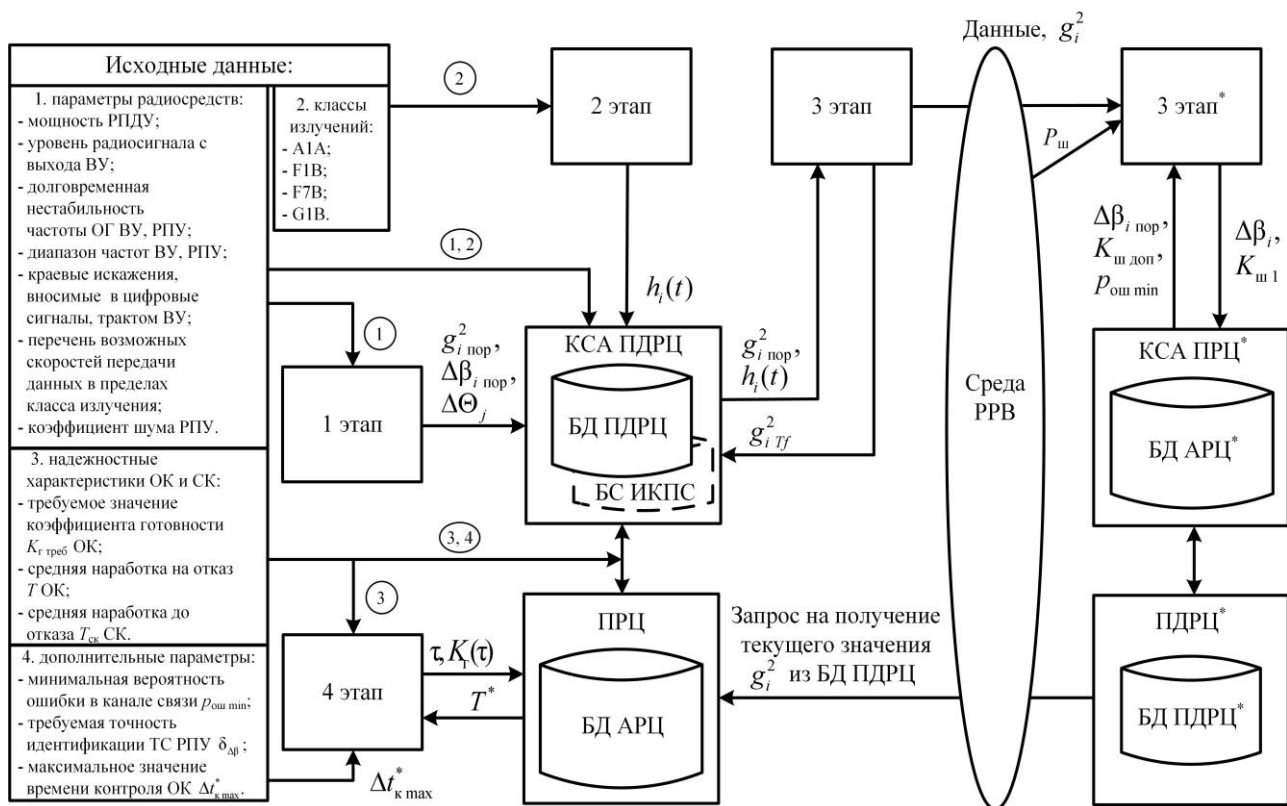
- 1) формирование базы данных (БД) пороговых значений ПКФ СРС ($g_{i\text{пор}}^2$, $\Delta\beta_{i\text{пор}}$) АРЦ, обеспечивающих $\max D(g_{i\text{пор}}^2)$ ($g_{i\text{пор}}^2 \subseteq G_{\text{доп}}$);
- 2) формирование базы состояний (БС) измерителя коэффициента подобия сигналов (ИКПС) в виде отсчетов импульсных характеристик $h_i(t)$ согласованных фильтров (СФ);
- 3) функциональный контроль СРС АРЦ;
- 4) расчет своевременности ФК СРС $\tau = \arg \max P_{\text{ок}}^*(\tau)$ при условии $P_{\text{ск}}(\tau) \geq P_{\text{ок}}^*(\tau)$ (далее по тексту (1)) и $P_{\text{ок}}^*(\tau) = K_r(\tau)$ ($T_B = 0$ ч).

Постановка задачи на разработку методики представлена на рис. 4 в виде общей схемы (а) и схемы с разбиением ее на этапы (б), на которой обозначены: 1, 2, 3, 3*, 4 – этапы методики, где 3* означает, что третий этап методики осуществляется, в том числе, на взаимодействующих (противоположных) АРЦ*; БД АРЦ, осуществляющая взаимодействие с БД передающего (ПДРЦ) и приемного (ПРЦ) радиосредств; КСА ПДРЦ (ПРЦ) – комплекс средств автоматизации ПДРЦ (ПРЦ); Θ_j – перечень контролируемых параметров с допусками $\Delta\Theta_j$, $j \in \{1, s\}$, s – количество контролируемых параметров;

$g_{i T_f}^2$, ($i \in \{1, \dots, u\}$; $T_s \in \{T_{s1}, \dots, T_{sv}\}$; $f \in \{f_1, \dots, f_q\}$) – матрица значений ПКФ РПДУ размером $T_{sv} \times f_q$, u – количество видов применяемых сигналов, v – количество длительностей элементов T_s применяемых сигналов, q – количество контролируемых частот f ; среда РРВ – среда распространения радиоволн.



а



б

Рис. 4. Постановка задачи на разработку методики в виде общей схемы (а) и схемы с ее разбиением на этапы (б)

Необходимо отметить, что задача первых двух этапов заключается в формировании первичной информации в БД (БС) комплекса средств автоматизации АРЦ, в части касающейся подсистемы КТС средств радиосвязи, в виде следующих исходных данных: $g_{i \text{пор}}^2$, $\Delta\beta_{i \text{пор}}$, $K_{\text{ш доп}}$, $h_i(t)$, которые, в свою очередь, являются входными данными для третьего этапа методики.

Третий этап методики является следствием модели ФК СРС АРЦ, описанной в работе [22], и отражает непосредственное применение радиосредств по назначению в процессе эксплуатации.

Назначение четвертого этапа методики заключается в установлении связи между временем функционального контроля, надежностью объекта и средств контроля, а также периодичностью контроля технического состояния радиосредств, что подробно рассмотрено в работе [17].

Решение оптимизационной задачи

Рассмотрим два варианта процедур функционального контроля:

- 1) контроль ПКФ СРС осуществляется в процессе функционирования, средства контроля обладают надежностными характеристиками (средняя наработка до отказа $T_{ск}$, срок службы);
- 2) в процессе ФК СРС не функционирует в течение времени Δt_k^* и продолжает выполнять свои функции после проведения процедуры контроля или восстанавливается. Надежность СК (затраты на контроль) не учитывается.

Условие (1) запишем в виде [19]

$$\exp\left(-\frac{n\Delta t_k^*}{\tau}\right) \geq \exp\left(-\frac{0,5\tau}{T^*}\right),$$

где n – натуральное число.

Интервал времени между процедурами функционального контроля СРС АРЦ примет вид, рис. 5 (а)

$$\tau \geq \sqrt{2nT^* \Delta t_k^*}, \tag{3}$$

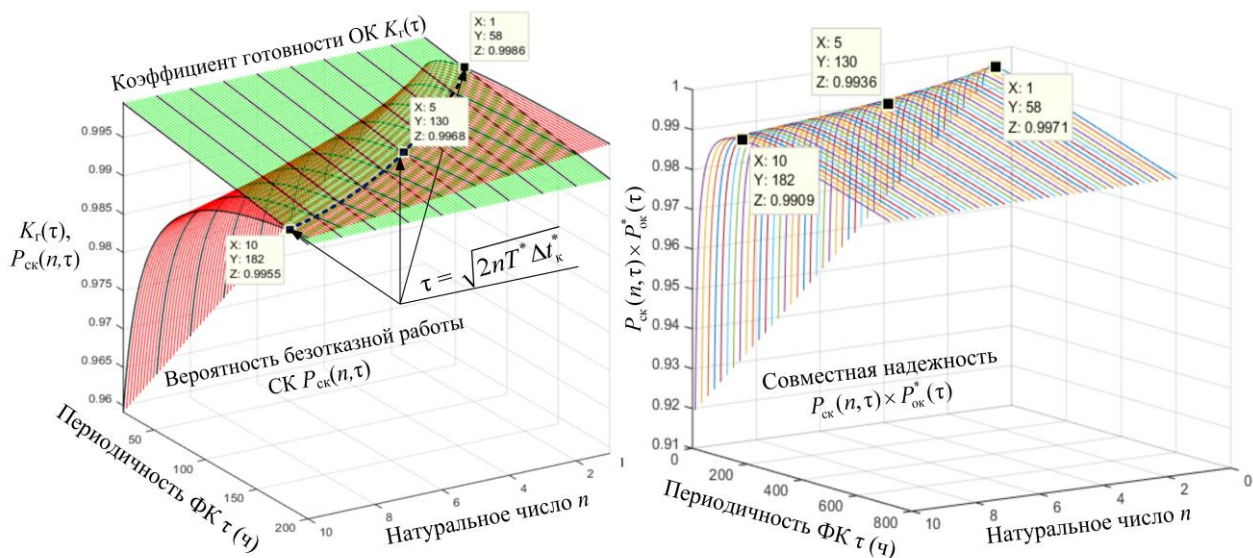


Рис. 5. Графики зависимостей $K_r(\tau)$, $P_{ск}(n, \tau)$ (а), совместной надежности СК-ОК (б)

Выражение (3) определяет диапазон значений для τ , при котором выполняется условие (1).

Найдем интервал времени между процедурами ФК СРС, максимизирующий общую надежность системы в виде средства и ОК $\max \{P_{\text{ск}}(n, \tau) \times P_{\text{ок}}^*(\tau)\}$. Функция $f(\tau) = P_{\text{ск}}(n, \tau) \times P_{\text{ок}}^*(\tau)$ принимает максимальное значение при $\tau = \sqrt{2nT^* \Delta t_k^*}$, рис. 5 (б).

Исходные данные для построения графиков (рис. 5): $T^* = 20000$ (ч); $\Delta t_k^* = 1/12$ (ч); $n = 1, \dots, 10$; $\tau \gg T_b$.

На рис. 5 (а) кривая линия, образованная пересечением графиков функций $P_{\text{ск}}(n, \tau)$ и $K_r(\tau)$, содержит множество точек с координатами (n, τ) , обеспечивающих $\max K_r(\tau)$ при условии (1).

Если СРС в течение времени параметрического контроля не используются по назначению и условие (1) не выполняется, то от коэффициента готовности необходимо перейти к коэффициенту технического использования, который при неравенстве $\tau \gg T_b$ примет вид

$$K_{\text{ти}}(\tau) = \frac{T^*(1 - \Delta t_k^*/\tau)}{T^* + 0,5\tau}. \quad (4)$$

Выражение (4) достигнет $\max \{K_{\text{ти}}(\tau)\}$ при $\tau = \sqrt{2T^* \Delta t_k^*}$ (рис. 6).

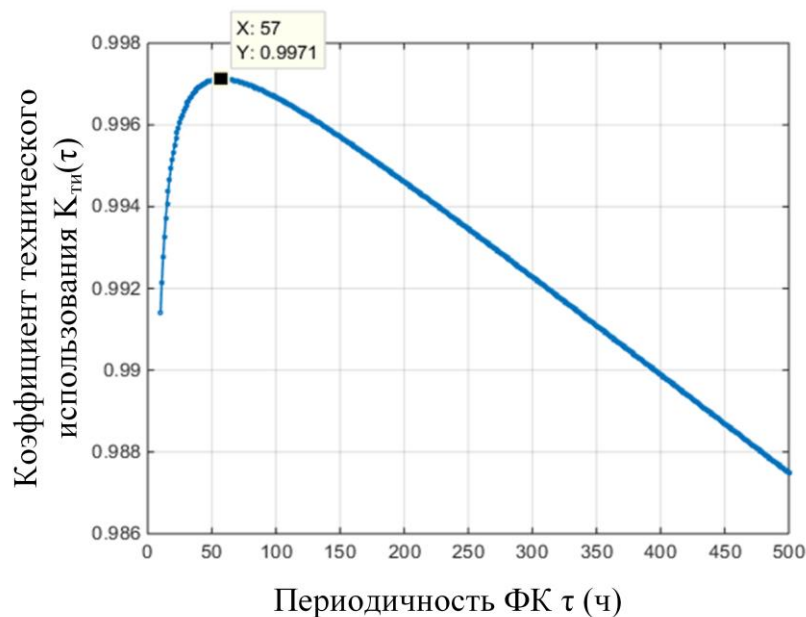


Рис. 6. График зависимости $K_{\text{ти}}(\tau)$

Полученные решения равны друг другу при $n = 1$ и обеспечивают максимизацию коэффициента технического использования без учета надежности характеристик СК.

Таким образом, решение (3), учитывающее надежность характеристики СК, является более общим и позволяет обеспечить максимизацию совместной надежности СРС АРЦ и СК.

Выражение (3) получено при наихудших условиях – экспоненциальном законе распределении вероятности безотказной работы СК и может служить,

при сохранении остальных параметров равными, в качестве оценки минимальной частоты дискретного ФК СРС на АРЦ и не зависит от количества контролируемых радиосредств.

Блок-схема алгоритма четвертого этапа методики по обеспечению требуемого значения коэффициента готовности средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра

Целью четвертого этапа методики ФК средств радиосвязи АРЦ является обеспечение выполнения нестрогого неравенства в виде: $K_r(\tau) \geq K_{r \text{ треб}}$, что соответствует обеспечению своевременности ФК радиосредств.

Рассмотрим порядок работы четвертого этапа методики в виде алгоритма, представленного на рис. 7.

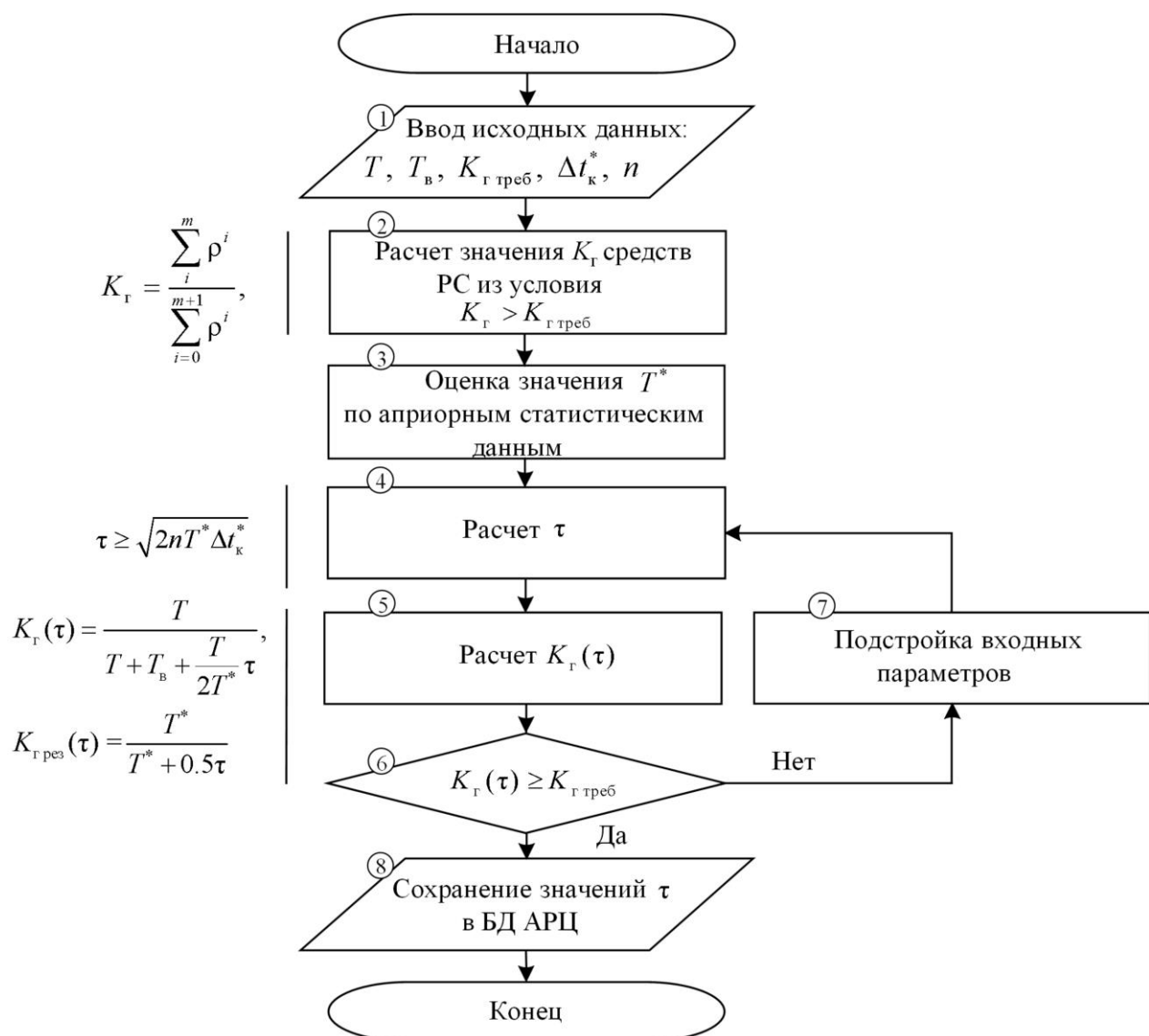


Рис. 7. Блок-схема алгоритма четвертого этапа методики по обеспечению своевременности функционального контроля СРС АРЦ

- 1) ввести исходные данные: $T, T_B, K_{г\text{треб}}, \Delta t_k^*, n$;
- 2) применить формулы из теории надежности и обеспечить выполнение условия $K_г > K_{г\text{треб}}$ (неравенство строгое);
- 3) произвести предварительную оценку среднего времени выхода определяющих параметров за пределы своих допусков $T^* (g_i^2 \geq g_{i\text{пор}}^2)$ по имеющейся статистике параметрических отказов. Если таких статистических данных нет, то априорную оценку среднего времени выхода определяющих параметров за пределы своих допусков осуществить из следующего выражения $T^* \approx (2 \dots 4)T$, а в процессе непосредственного применения по назначению контролируемых радиосредств (всей автоматизированной сети радиосвязи [26, 27]) производить ее коррекцию по собранной статистике параметрических отказов [5, 12];
- 4) рассчитать с помощью выражения (3) периодичность ФК СРС. Расчет τ осуществлять, начиная с $n = 1$ и т. д.;
- 5) определить значение $K_г(\tau)$ по формуле [19]:

$$K_г(\tau) = T / (T + T_B + 0,5T\tau / T^*); \quad (5)$$
- 6) проверить соблюдение условия $K_г(\tau) \geq K_{г\text{треб}}$. Проверку осуществлять с $n = 1$ и т. д. и добиться выполнения условия $K_г(\tau) \geq K_{г\text{треб}}$ при максимальном значении n . Если условие выполняется, то осуществляем переход к шагу 8, если нет, то к шагу 7;
- 7) произвести корректировку входных параметров и добиться выполнения условия $K_г(\tau) \geq K_{г\text{треб}}$;
- 8) сохранить значение τ в БД АРЦ.

Расчет своевременности ФК СРС на примере выпрямительного устройства (ВУ) серии Р-170В приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета своевременности ФК СРС на примере ВУ серии Р-170В

Исходные данные		Методика обеспечения своевременности ФК СРС			
Р-170В	ИКПС	–	τ_1 (ч)	τ_2 (ч)	τ_3 (ч)
		$K_{г\text{треб}}$	$K_г$	$K_г(\tau)$	$K_{г\text{то}}$
1. $T = 7000$ ч	1. $T_{\text{ск}} = 20000$ ч	–	0	152	8760 (T)
2. $T_B = 35$ ч	2. $\Delta t_k^* = 1/12$ ч	0,99	0,995	0,992	0,89
3. $P^* = 0,25$	3. $n = 5$				
4. $K_{г\text{треб}} = 0,99$					
Своевременность ФК СРС обеспечивается при $\tau = 152$ ч: $K_г > K_г(\tau) \geq K_{г\text{треб}}$					

- 1) ресурс ВУ Р-170В составляет: $t_{\text{рес}} = 55000 \times 2,7 = 148500$ ч и предусмотрено три средних ремонта;
- 2) по ГОСТ [22] время восстановления не должно превышать $T_{в1} = 15$ мин;

- 3) средний ремонт не должен превышать 30 суток (примем 10 суток), тогда $T_B = 0,25 \text{ ч} + (3 \times 10 \times 24 \text{ ч}) / 21 = 34,5 \text{ ч}$ ($148500 \text{ ч} / 7000 \text{ ч} = 21$ – ремонт);
- 4) $K_r = T / (T + T_B) = 7000 \text{ ч} / (7000 \text{ ч} + 34,5 \text{ ч}) = 0,995$;
- 5) $K_{r\text{то}} = T / (T + 0,5(T/T^*) \times T) = 7000 \text{ ч} / 7875 \text{ ч} = 0,89$ ($8760 \text{ ч} > T$, $\tau = T$);
- 6) $\tau \geq \sqrt{2nT^* \Delta t_k^*} = \sqrt{2 \cdot 5 \cdot 28000 \cdot (1/12)} = \sqrt{23333} = 152 \text{ ч}$;
- 7) $K_r(\tau) = T / (T + T_B + 0,5T\tau/T^*) = 7000 \text{ ч} / (7000 \text{ ч} + 34,5 \text{ ч} + 0,5 \times 0,25 \times 152 \text{ ч}) = 0,992$.

Повышение коэффициента готовности СРС АРЦ за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов определим через отношение: $\delta_{\Delta K_r} = (\Delta K_r / K_{r\text{то}}) \times 100 \%$. Разность коэффициентов готовности $\Delta K_r = K_r(\tau) - K_{r\text{то}}$, где $K_{r\text{то}}$ – коэффициент готовности радиосредств до реализации методики обеспечения своевременности ФК СРС АРЦ. В настоящее время интервал времени между процедурами инструментального контроля (ТО-2) составляет один год (8760 ч.), что больше средней наработки на отказ СРС T , поэтому для оценки $K_r(\tau)$ будем считать $\tau = T$, тогда $\delta_{\Delta K_r}$ запишем в виде:

$$\delta_{\Delta K_r} = (0,5P^* / (1 + P)) \times 100 \%,$$

где $P^* = T/T^*$ – доля параметрических отказов СРС в течение времени T , $P = T_B/T$ – отношение среднего времени восстановления к средней наработке на отказ СРС (рис. 8).

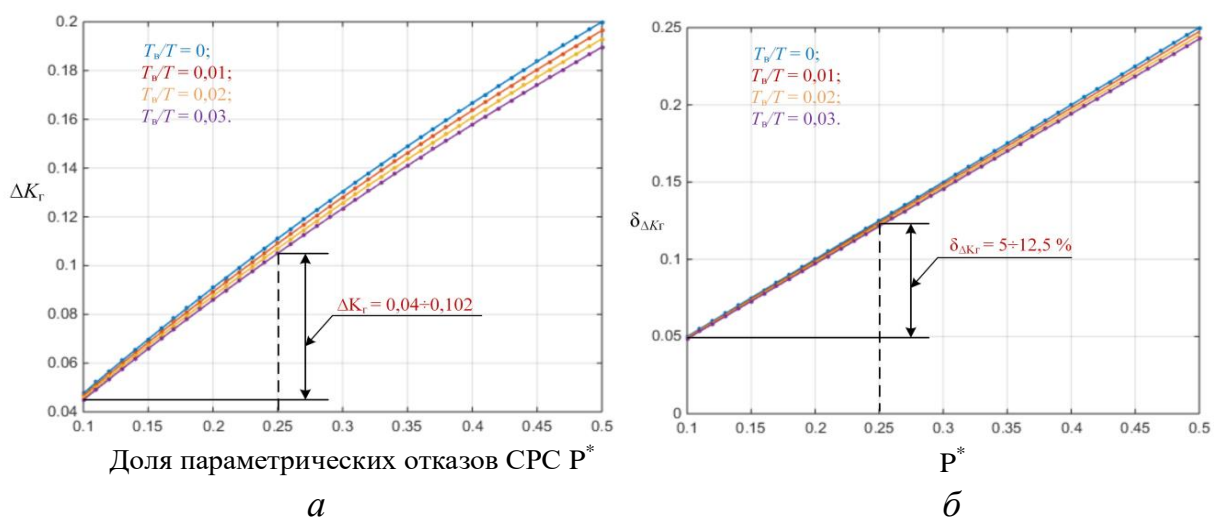


Рис. 8. Графики зависимости абсолютной ΔK_r (а) и относительной $\delta_{\Delta K_r}$ (б) оценки выигрыша в значении коэффициента готовности СРС от реализации методики обеспечения своевременности их ФК

Из выражения (5) следует, что $K_r = K_r(\tau)$:

- 1) $\tau = 0$ ч, что для параметрического контроля является ресурсозатратным и практически обеспечено быть не может (в настоящее время КТС осуществляется 1 раз в год с регулировкой частоты опорного генератора, при этом чувствительность и амплитудно-частотная характеристика только контролируются);

2) $T^* \rightarrow \infty$, что означает то, что параметры радиосредств всегда находятся в пределах своих допусков (дрейф отсутствует).

Следовательно, $K_r > K_r(\tau)$, но возможно выполнить условие $K_r(\tau) \geq K_{r \text{ треб}}$ за счет своевременности обнаружения скрытых параметрических отказов СРС АРЦ в процессе ФК.

Таким образом, относительное повышение коэффициента готовности СРС от реализации методики ФК СРС АРЦ составляет от 5 до 12,5 % и будет зависеть от параметрической надежности – среднего времени выхода определяющих параметров радиосредств за пределы установленных допусков.

Заключение

Используемые в настоящее время методы повышения надежности объектов (систем) в своих математических выражениях не учитывают интервал времени неправильного функционирования (диагностический аспект надежности), который возникает из-за нераспознанного (скрытого) параметрического отказа, т. е. они определены для случая идеального диагностического обеспечения, что не соответствует действительности.

В настоящей методике показано, что при применении резервирования именно интервал неправильного функционирования средств радиосвязи будет оказывать основное влияние на их коэффициент готовности и благодаря методике функционального контроля СРС это влияние удастся сократить.

В статье представлена постановка научной задачи исследования с последующей ее декомпозицией на частные задачи. Представленное решение научной задачи позволяет достичь цели работы – повышение коэффициента готовности средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля.

Первые три этапа методики предназначены для решения диагностической задачи – определение вида технического состояния средств радиосвязи, тогда как ее четвертый этап обеспечивает своевременность их функционального контроля.

Кроме того, в работе при постановке научной задачи учтены показатели надежности как объекта, так и средств контроля, при этом СК рассматривается как вышестоящая система с ограниченным ресурсом.

Стремление использовать спектрально-эффективные сигналы приводит к повышению требований к стабильности и сокращению допусков на параметры аппаратуры, что требует дополнительных исследований по установлению функциональных зависимостей показателя качества функционирования средств радиосвязи от параметров аппаратуры и определению аналитических выражений метрик оценок [28-30] их ПКФ, а также по созданию решений на уровне принципиальных электрических схем и программных средств, позволяющих реализовать на практике предложенный способ функционального контроля средств радиосвязи и осуществлять интеллектуальный анализ накопленных данных контроля их технического состояния.

Литература

1. Ключев В. В., Пархоменко П. П., Абрамчук В. Е. Технические средства диагностирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
2. Гуменюк В. М. Надежность и диагностика электротехнических систем: Учеб. пособие для вузов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. – 218 с.
3. ГОСТ 20911 – 89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 11 с.
4. Будко П. А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2012. – 512 с.
5. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ–Петербург, 2006. – 704 с.
6. Подмастерьев К. В., Моисеев С. А. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени. Часть 1. Теоретические основы и модели, характеристики дрейфа параметров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 3-2 (293). С. 135–144.
7. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 32 с.
8. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
9. Сугак Е. В. Прикладная теория надежности. Часть 2. Надежность технических систем: учебник для вузов. – СПб.: Лань, 2022. – 240 с.
10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
11. Головин А. Г., Алисевиц Е. А., Гусев А. П., Дорошенко Г. П. Основы надежности средств связи и автоматизации: Учебник. – СПб.: ВАС, 2019. – 178 с.
12. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
13. Сугак Е. В. Надежность технических систем. – Красноярск: Раско, 2001. – 608 с.
14. Африкантов Н. Н., Ануфриев А. А., Баринов М. А., Барышников Н. В. Основы надежности средств связи и автоматизации / Под ред. Р. Г. Зиганшина. – СПб.: ВАС, 2009. – 356 с.
15. Александровский Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем – М.: Логос, 2003. – 208 с.
16. Моисеев С. А. Метод прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Моисеев Сергей Александрович. – Орел: ГУ-УНПК, 2013. – 198 с.
17. Голунов М. В. Своевременность контроля технического состояния средств радиосвязи // Техника средств связи. 2021. № 4 (156). С. 61–68.

18. Голунов М. В. Методика контроля технического состояния средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра // Вопросы оборонной техники. 2022. № 173–174. С. 113–122.

19. Голунов М. В. Методика функционального контроля средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра // Техника средств связи. 2022. № 3 (159). С. 30–52.

20. Макаренко С. И. Справочник научных терминов и обозначений. – СПб.: Научные технологии, 2019. – 254 с.

21. Захаров Г. П., Яновский Г. Г. Интегральные цифровые сети связи // Итоги науки и техники. Электросвязь. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1986. С. 3–101.

22. Голунов М. В. Аналитическая модель контроля технического состояния радиосредств радиолинии в процессе функционирования с предварительной оценкой сигнальной и помеховой обстановки в канале связи // Техника средств связи. 2022. № 1 (157). С. 69–95.

23. Бутырин А. В., Дорожко И. В., Кочанов И. А., Осипов Н. А. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем. Разработка и эксплуатация вооружения и военной техники // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2016. № 652. С. 137–146.

24. Барановский А. М., Привалов А. Е. Система контроля и диагностирования бортового оборудования малого космического аппарата // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 4. С. 51–56.

25. Дайнеко С. Г. Определение оптимальной периодичности контроля образцов РТВ ВМФ // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: 2012. – С. 268–273.

26. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Основные направления модернизации декаметрового радиосредства связи // Техника средств связи. 2019. № 1 (145). С. 13–25.

27. Аллакин В. В., Голунов М. В. Анализ научно-методического аппарата удаленного мониторинга технического состояния информационно-телекоммуникационных сетей и систем // Техника средств связи. 2020. № 4 (152). С. 17–37.

28. Georgiadis A. Gain, phase imbalance, and phase noise effects on error vector magnitude // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2004. vol. 53. iss. 2. pp. 443–449. DOI: 10.1109/TVT.2004.823477.

29. Jacobus de Witt J., Gert-Jan van Rooyen. A Blind I/Q Imbalance Compensation Technique for Direct-Conversion Digital Radio Transceivers // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2009. vol. 58. iss. 4. pp. 2077–2082. DOI: 10.1109/TVT.2008.2005414.

30. Schmogrow R., Nebendahl B., Winter M., Josten A., Hillerkuss D., Koenig S., Meyer J., Dreschmann M., Huebner M., Koos C., Becker J., Freude W. and Leuthold J. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats // Photonics Technology Letters. 2012. vol. 24. iss 1. pp. 61–63. DOI: 10.1109/LPT.2011.2172405.

References

1. Klyuev V. V., Parkhomenko P. P., Abramchuk V. E. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya* [Technical means of diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 672 p. (in Russian).
2. Gumenyuk V. M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh sistem* [Reliability and diagnostics of electrical systems]. Vladivostok. Publishing House of the Far Eastern State Technical University Publ., 2010. 218 p. (in Russian).
3. GOST 20911 – 89. *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya* [Technical diagnostics. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 11 p. (in Russian).
4. Budko P. A. *Upravlenie resursami informacionno-telekommunikacionnykh sistem. Metody optimizatsii: Monografiya* [Resource Management of information and telecommunication systems. Optimization methods: Monograph]. Saint Petersburg, Military Academy of Communications Publ., 2012. 512 p. (in Russian).
5. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg., BHV–Petersburg Publ., 2006. 704 p. (in Russian).
6. Podmasteryev K. V., Moiseev S. A. The predicting control of radio-electronic equipment with adaptive intervals of time. Part 1. Theoretical foundations and models, characteristics of parameters' drifting. *Fundamental and applied problems of Engineering and Technology*, 2012, no. 3-2 (293), pp. 135-144 (in Russian).
7. GOST 27.002-2015. Reliability in technology. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow, Standartov Publ., 2015. 32 p. (in Russian).
8. Davydov P. S. *Tekhnicheskaya diagnostika radioelektronnykh ustroystv i sistem* [Technical diagnostics of radio-electronic devices and systems]. Moscow, Radio and Communications, 1988. 256 p. (in Russian).
9. Sugak E. V. *Prikladnaya teoriya nadezhnosti. CHast' 2. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Applied theory of reliability. Part 2. Reliability of technical systems]. St. Peterburg, Lan' Publ., 2022. 240 p. (in Russian).
10. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenij* [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976. 166 p. (in Russian).
11. Golovin A. G., Alisevich E. A., Gusev A. P., Doroshenko G. P. *Osnovy nadezhnosti sredstv svyazi i avtomatizatsii* [Fundamentals of reliability of communications and automation]. St. Petersburg. Military Academy of Communications Publ., 2019. 178 p. (in Russian).
12. Cherkesov G. N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* [Reliability of hardware and software complexes]. St. Petersburg, Peter Publ., 2005. 479 p. (in Russian).
13. Sugak E. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, Rasko Publ., 2001. 608 p. (in Russian).
14. Afrikantov N. N., Anufriev A. A., Barinov M. A., Baryshnikov N. V. Ed. R. G. Ziganshina. *Osnovy nadezhnosti sredstv svyazi i avtomatizatsii* [Fundamentals

of reliability of means of communication and automation]. St. Petersburg, Military Academy of Communications Publ., 2009. 356 p. (in Russian).

15. Alexandrovsky L. N. *Sovremennye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnyh tekhnicheskikh sistem* [Modern methods of ensuring reliability of complex technical systems]. Moscow, Logos Publ., 2003. 208 p. (in Russian).

16. Moiseev S. A. *Metod prognoziryushchego kontrolya radioelektronnoj apparatury s adaptaciej mezhkontrol'nogo intervala*. Diss. kand. then. nauk [Method of predictive control of electronic equipment with adaptation of the intercontrol interval. Ph.D. Tesis]. Orel, State University – educational, scientific and production complex Publ., 2013. 198 p. (in Russian).

17. Golyunov M. V. Timeliness of monitoring the technical condition of radio communications. *Means of communication equipment*, 2021, no. 4 (156), pp. 61–69 (in Russian).

18. Golyunov M. V. Methodology for monitoring the technical condition of radio communications equipment of an automated radio center. *Enginery Problems*. 2022, i. (173–174), pp.113–122 (in Russian).

19. Golyunov M. V. Methodology of functional control of radio communication facilities of an automated radio center. *Means of Communication Equipment*, 2022, no. 3 (159), pp. 30-52. DOI: 10.24412/2782-2141-2022-3-30-52 (in Russian).

20. Makarenko S. I. *Spravochnik nauchnyh terminov i oboznachenij* [Handbook of scientific terms and designations]. St. Petersburg, Science–intensive technologies Publ., 2019. 254 p. (in Russian).

21. Zakharov G. P., Yanovsky G. G. *Integral'nye cifrovye seti svyazi*. [Integrated digital communication networks]. *Itogi nauki i tekhniki. Elektrosvyaz'* [Results of science and technology. Telecommunications]. Vol. 1. Moscow, All-Russian Institute of Scientific and Technical Information Publ., 1986, pp. 3–101 (in Russian).

22. Golyunov M. V. Analytical model for monitoring the technical condition of radio equipment of radio line in the process of functioning with a preliminary assessment of the signal and interference situation in the communication channel. *Means of Communication Equipment*, 2022, no. 1 (157), pp. 69-95. DOI: 10.24412/2782-2141-2022-1-69-95 (in Russian).

23. Butyrin A. V., Dorozhko I. V., Kochanov I. A., Osipov N. A. *Kompleksnaya model' nadezhnosti i diagnostirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh sistem. Razrabotka i ekspluatatsiya vooruzheniya i voennoj tekhniki* [Complex model of reliability and diagnostics complex technical systems. Development and operation of weapons and military equipment]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2016, no. 652, pp. 137–146 (in Russian).

24. Baranovsky A. M., Privalov A. E. *Sistema kontrolya i diagnostirovaniya bortovogo oborudovaniya malogo kosmicheskogo apparata* [System of monitoring and diagnostics of onboard equipment of a small spacecraft]. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, v. 52, no. 4, pp. 51–56 (in Russian).

25. Daineko S. G. *Opredelenie optimal'noj periodichnosti kontrolya obrazcov RTV VMF*. [Determination of the optimal frequency of control of samples of the

Navy RTV]. *Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoj i special'noj tekhniki»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Modern problems of creation and operation of weapons, military and special equipment"]. St. Petersburg, 2012, pp. 268–273 (in Russian).

26. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. Osnovnye napravleniya modernizatsii dekametrovoj sistemy svyazi [The main directions of modernization of the decimeter communication system]. *Means of Communication Equipment*, 2019, no. 1 (145), pp. 13–25 (in Russian).

27. Allakin V. V., Golyunov M. V. Analysis of the scientific and methodological apparatus for remote monitoring of the technical state of information and telecommunication networks and systems. *Means of Communication Equipment*, 2020, no. 4 (152), pp. 17–37 (in Russian).

28. Georgiadis A. Gain, phase imbalance, and phase noise effects on error vector magnitude. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, vol. 53, is. 53, pp. 443–449. DOI: 10.1109/TVT.2004.823477.

29. Jacobus de Witt J., Gert-Jan van Rooyen. A Blind I/Q Imbalance Compensation Technique for Direct-Conversion Digital Radio Transceivers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, vol. 58, is. 4, pp. 2077–2082. DOI: 10.1109/TVT.2008.2005414.

30. Schmogrow R., Nebendahl B., Winter M., Josten A., Hillerkuss D., Koenig S., Meyer J., Dreschmann M., Huebner M., Koos C., Becker J., Freude W. and Leuthold J. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2012, vol. 24, is. 1, pp. 61–63. DOI: 10.1109/LPT.2011.2172405.

Статья поступила 04 апреля 2023 г.

Информация об авторах

Будко Павел Александрович – доктор технических наук, профессор. Ученый секретарь. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: синтез информационно-телекоммуникационных систем. E-mail: budko62@mail.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Голунов Михаил Валерьевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: техническая диагностика средств связи. E-mail: belka1213@mail.ru.

Адрес: 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

Аллакин Владимир Васильевич – кандидат технических наук. Независимый специалист. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. E-mail: vladimir@duduh.ru.

Адрес: 188660, Ленинградская обл., Всеволожский район, пос. Бугры, ул. Школьная, дом 11.

Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control

P. A. Budko, M. V. Golyunov, V. V. Allakin

Statement of the problem: the article carries out a mathematical statement and solution of the scientific problem in terms of ensuring the timeliness of functional control of radio communication facilities of an automated radio center, allowing to increase their availability factor, due to the timely detection of their parametric failures in the transition to a state-based maintenance strategy, its decomposition into partial tasks is made. **The purpose the work is** to determine and substantiate the way to solve the scientific problem, due to the transition from parametric control to quality control of the functioning of radio communications, which makes it possible to increase their readiness factor due to the timely detection of parametric failures in the transition to a maintenance strategy for the condition. **Used methods:** theoretical and methodological basis for the statement of the scientific problem of research were the fundamental bases and mathematical apparatus of theories of reliability, technical diagnostics, systems and systems analysis, the theory of electrical communication. **Novelty:** in taking into account the diagnostic aspect of the reliability of radio communications when setting and solving the mathematical problem of research, as well as the probability of failure-free operation of the means of control. **Result:** the formulation and solution of the scientific problem of research to improve the availability factor of radio communications, identified the essential factors, constraints and assumptions. **Theoretical significance:** The received results consist in the development of radio wave method of nondestructive testing as applied to the functional control of radio communication facilities of an automated radio center, as well as in further development of the scientific and methodological apparatus of testing and diagnostics, taking into account the impact of the duration and frequency of functional testing of radio facilities, in a system formed by the means and the test object, with a limited resource of subsystems included in it.

Key words: automated radio center, radio facilities, reliability, functional control, maintenance, parametric failure.

Information on Authors

Pavel Aleksandrovich Budko – Doctor of Technical Sciences, Professor. Scientific Secretary. Public Joint-Stock Company “Information Telecommunication Technologies”. Research interests: synthesis of information and telecommunication systems. E-mail: budko62@mail.ru

Address: 197342, Russia, St. Petersburg, st. Kantemirovskaya, 8.

Golyunov Mikhail Valeryevich – Doctoral Student. Adjunct of the Department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: technical diagnostics of communication means. E-mail: belka1213@mail.ru

Address: 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky prospect, 3.

Vladimir Vasilyevich Allakin – Ph.D. of Engineering Sciences. An independent specialist. Field of research: information monitoring; data acquisition. E-mail: vladimir@duduh.ru

Address: 188660, Russia, Leningrad region, Vsevolzhsky district, vil. Buhry, Shkolnaya str., 11, build. 1.