

Для цитирования: Создание и эксплуатация радиолокационных станций дальнего обнаружения / С. Ф. Боев, А. А. Рахманов, А. П. Линкевичиус, С. В. Якубовский, П. В. Володин // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 5. С. 35–48. DOI 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48
УДК 621.396.75

**С. Ф. Боев¹, А. А. Рахманов¹, А. П. Линкевичиус¹, С. В. Якубовский²,
П. В. Володин¹**

¹ ПАО «МАК «Вымпел», ² НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВКС МО РФ

СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ*

Целью статьи является обоснование необходимости и краткое изложение отдельных современных подходов, методов и технологий создания и эксплуатации радиолокационных станций дальнего обнаружения (РЛС ДО). Предложен метод управления созданием РЛС ДО на основе моделей рисков, позволяющий найти оптимальную совокупность аппаратных, функциональных и программных решений. Показана возможность применения в автоматизированной системе управления созданием РЛС ДО стенда Генерального конструктора (СГК). Предложен вариант построения комплекса автоматизированной информационно-логистической поддержки эксплуатации. Разработаны методика и алгоритм расчета показателей регламента адаптивного технического обслуживания. Представлен опыт применения новых методов и технологий при создании и эксплуатации РЛС ДО проекта «Воркута». Сделаны выводы о необходимости развития полученных результатов в целях оптимизации ресурсов и обеспечения длительного работоспособного состояния информационных средств систем РКО.

Ключевые слова: система эксплуатации, критерий минимума среднего риска, единая платформа проектирования, стенд Генерального конструктора, адаптивное техническое обслуживание

Введение

Радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО) составляют основную наземную информационную платформу систем ракетно-космической обороны (РКО): контроля космического пространства (ККП), предупреждения о ракетном нападении (ПРН), противоракетной обороны (ПРО). При этом РЛС ДО обладают рядом особенностей, позволяющих выделить их в отдельный вид радиолокационных средств [1, 2].

Отличительные особенности РЛС ДО:

- большие дальности действия (> 3000 км);
- большие точности определения координат и разрешающие способности (метры, угловые минуты);
- высокие надежностные характеристики (K_f , $P(t_3) > 0,99$);
- длительные сроки эксплуатации (более 10 лет);
- использование цифровых активных фазированных антенных решеток и сложнейших аппаратно-программных комплексов;

- поддержание заданных тактико-технических характеристик и боевого комплекта в режиме непрерывного функционирования.

Основной отличительной особенностью РЛС ДО является их непрерывная работа в течение всего срока эксплуатации (10 лет и более), что требует поддержания работоспособности боевого комплекта аппаратных средств и обеспечивающих систем, а также программно-алгоритмического комплекса в течение всего этого периода.

Наряду с информацией от других систем РКО (космический эшелон системы ПРН, группировка искусственных спутников Земли системы ККП), информация от наземных РЛС ДО используется для принятия решений, имеющих высокую цену. Учитывая это, к ним предъявляются беспрецедентно высокие требования по достоверности и оперативности выдаваемой информации.

Скоротечность процессов боевой работы РЛС ДО, а также высокие требования к достоверности принимаемых решений требуют обеспечения

* Основные результаты работы были обсуждены на научно-технической конференции «VII Репинские чтения» в ПАО «МАК «Вымпел».

высокого уровня автоматизации обработки информации во всех звеньях функционирования станций на основе высокопроизводительных вычислительных средств, обеспечивающих работу боевых алгоритмов и программ в режиме реального времени.

В процессе непрерывного функционирования на РЛС ДО возлагается задача дальнего радиолокационного обнаружения баллистических ракет с последующим сопровождением множественных целей, во время которого необходимо различить боевые блоки, ложные цели, обломки ракеты-носителя и пассивные отражатели, что составляет одну из наиболее сложных задач современной радиолокации.

Наземные РЛС ДО являются сложными наукоемкими изделиями, в которых используются новейшие достижения в области информационных технологий радиоэлектронных систем. Они отличаются, прежде всего, тем, что являются высокопотенциальными и обладают техническими характеристиками и функциональными возможностями, близкими к предельно достижимым на период их создания. В режиме обнаружения баллистических, аэродинамических и космических целей РЛС ДО осуществляют программный обзор и зондирование заданных секторов обзора узконаправленными и барьерными лучами с применением современных методов и аппаратно-программных комплексов, обеспечивающих оптимизацию формирования, излучения, приема и обработки радиолокационной информации. В комплексе это позволяет достигать больших дальностей обнаружения, высоких точностей определения координат и разрешающих способностей по координатам [3].

В задачи РЛС ДО входит обнаружение, селекция, завязывание и сопровождение траекторий

целей, выдача координатной информации по ним для принятия соответствующих решений. Существующие наземные РЛС ДО создавались, начиная с 1960-х годов, с использованием перспективных научно-технических решений, новых технологий и электронной компонентной базы (ЭКБ). Одновременно с этим основные принципы построения РЛС, формирования, излучения, приема и обработки радиолокационной информации были едины для всех поколений РЛС. Это диктовалось необходимостью соблюдения преемственности в создании и эксплуатации станций всех поколений (рис. 1).

Длительное использование традиционных подходов и методов создания и эксплуатации РЛС ДО без учета изменений в информационных задачах, технологиях, методах построения привело к ряду проблем.

Проблемные вопросы создания и эксплуатации РЛС ДО

Создание

При разработке всех поколений РЛС ДО сложилась одноуровневая структура среды проектирования с применением традиционной линейной схемы, в которой процесс проектирования реализуется в виде последовательности стадий и этапов, завершающихся принятием проектного решения на уровне Генерального конструктора (рис. 2).

Характеризуя данную структуру среды проектирования в целом применительно к созданию РЛС ДО как сложных технических систем, следует отметить ряд ее недостатков и ограничений [4]:

- Генеральный конструктор перегружен анализом большого объема разрозненных данных и необходимостью принятия многочисленных решений,



Рисунок 1. Существующие и перспективные радиолокационные станции дальнего обнаружения



Рисунок 2. Обобщенная структура сложившейся среды проектирования и создания сложных технических систем

на основании которых складывается общий облик создаваемого изделия – РЛС ДО. Это не позволяет ему полностью сосредоточиться на наиболее важных вопросах, определяющих качество и успешность проектирования;

- принятие решений в представленной структуре предъявляет высокие требования к знаниям, опыту и профессиональной интуиции конструкторов, принимающих базовые проектные решения. Это определяет ведущую роль Генерального конструктора в процессе создания изделия и создает определенные сложности в привлечении необходимых специалистов;
- низкий уровень автоматизации принятия решений и жесткие временные рамки проектирования не позволяют производить оценку различных

вариантов построения РЛС ДО с учетом многообразия ограничений и требований. Вследствие этого принятые решения могут оказаться неоптимальными, что приводит к ухудшению стоимостных показателей изделия;

- ввиду высокой трудоемкости деятельности Генерального конструктора высока возможность принятия нерациональных и ошибочных проектных решений, исправление которых приводит к увеличению сроков и стоимости проектирования создаваемого изделия.

При усложнении РЛС ДО и переходе к современным технологиям автоматизированного проектирования, основанным на совмещении имитационных моделей с физическими модулями и блоками



Рисунок 3. Проблемы создания радиолокационных станций дальнего обнаружения и возможные их решения



Рисунок 4. Общие проблемы радиолокационных станций дальнего обнаружения в процессе эксплуатации



Рисунок 5. Технические и технологические проблемы

на разных стадиях и этапах проектирования, разнообразие различных вариантов построения РЛС ДО резко возрастает, что делает сложившуюся структуру среды проектирования практически неэффективной из-за отмеченных недостатков.

Обобщенно проблемы создания РЛС ДО и возможные решения представлены на рис. 3.

Эксплуатация

Под системой эксплуатации в общем случае понимается совокупность объектов и средств эксплуатации, исполнителей (обслуживающего персонала) и устанавливающих правила их взаимодействия документации, которые необходимы и достаточны для выполнения задач эксплуатации.

Качество системы эксплуатации зависит от уровня соответствия текущих свойств и характеристик (эксплуатационных) изделия заданным и определяется путем оценок заложенных (назначенных) параметров и характеристик, качества функционирования, состояния системы ремонта и восстановления, надежности, временных и экономических показателей.

Непрерывное совершенствование РЛС ДО, усложнение и расширение их функциональных возможностей от поколения к поколению, внедрение в практику эксплуатации сложных наукоемких технических систем, отсутствие научно-методического обоснования и необходимых изменений в подходах к эксплуатации и управлению ее качеством

привело к ряду проблем, которые требуют разрешения (рис. 4, 5).

Научная школа по анализу проблем и возможных новых решений в вопросах создания и эксплуатации РЛС ДО

В целях анализа и решения назревших проблем в вопросах создания и эксплуатации РЛС ДО в 2005 году под руководством С. Ф. Боева и А.А. Рахманова была создана научная школа «Научные и инженерные основы создания перспективных высокоинформативных радиолокационных станций дальнего обнаружения».

В период 2016–2017 гг. деятельность научной школы получила развитие в рамках гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ. Основные направления исследований научной школы показаны на рис. 6.

В результате проводимых исследований и выработки предложений научной школой разработаны новые подходы, методы и технологии создания и эксплуатации РЛС ДО. Основные из них представлены в настоящей работе.

Новые решения, технологии и методы Единая платформа проектирования (ЕПП)

Основой автоматизированного проектирования перспективных РЛС ДО, создаваемых по технологии высокой заводской готовности (ВЗГ), является



Рисунок 6. Основные направления первоочередных исследований

платформенный подход, который в настоящее время получает распространение в области построения сложных технических и информационно-программных систем.

В соответствии с этим единая платформа проектирования РЛС ДО определяется как интегрированная совокупность составляющих базовую структуру проектирования информационно-алгоритмических средств САПР, совместное использование которых обеспечивает единство структурных, технических, технологических и программных решений при создании унифицированного ряда РЛС ДО [4].

При использовании единой платформы проектирования унифицированного ряда РЛС ДО платформенный подход реализуется в рамках двухуровневой организации средств создания сложных

технических систем. На рис. 7 представлена обобщенная структура такой среды проектирования.

Платформенный подход к проектированию и двухуровневая структура организации средств создания РЛС ДО позволяют устранить отмеченные выше недостатки и ограничения существующей проектной среды. Предлагаемая структура среды проектирования на основе единой платформы имеет следующие отличительные особенности [4]:

- Генеральный конструктор освобождается от необходимости анализа большого объема разрозненных данных и принятия многочисленных низкоуровневых решений. Это позволяет ему в процессе создания изделия РЛС ДО полностью сосредоточиться на контроле и решении наиболее важных вопросов;

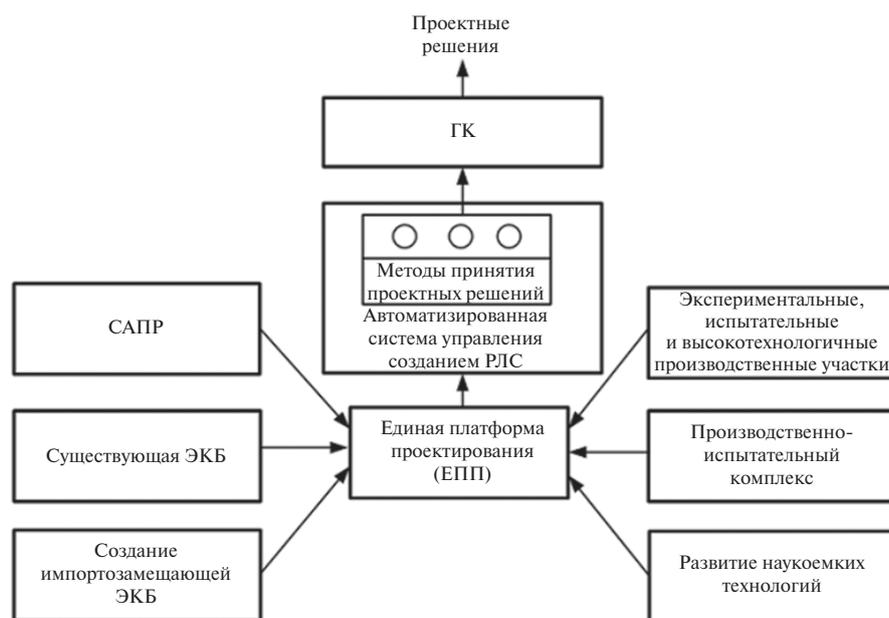


Рисунок 7. Предлагаемая обобщенная двухуровневая структура среды проектирования и создания сложных технических систем

- существенно уменьшается роль Генерального конструктора в принятии частных проектных решений. Высокий уровень автоматизации, основанный на двухуровневой структуре и единой информационной платформе, а также автоматизации принятия решений позволяют снизить профессиональные требования к конструкторам, участвующим в процессе создания изделия РЛС ДО. Основная роль Генерального конструктора в этом случае состоит в общей оценке проектных решений и общем контроле процесса создания изделия;
- высокий уровень автоматизации принятия решений позволяет производить оценку всевозможных вариантов построения РЛС ДО с учетом многообразия ограничений и требований. Это дает возможность определять оптимальные варианты построения РЛС ДО с учетом имеющегося ресурса по времени и стоимости, что способствует повышению эффективности проектирования и успешности создания изделия с заданными тактико-техническими характеристиками;
- средства автоматизации предоставляют возможность выполнения анализа большого числа вариантов при принятии проектных решений с целью выбора наиболее подходящего варианта. Это существенно снижает возможность принятия нерациональных и ошибочных проектных решений, что также способствует повышению эффективности проектирования и успешности создания изделия.

Метод оценки и минимизации среднего риска создания РЛС ДО

Совокупность информационно-алгоритмических средств единой платформы проектирования создает основу для применения платформенного подхода к определению оптимальной структуры РЛС ДО по критерию минимального риска создания, которая выступает в качестве базовой структуры для автоматизации процесса управления созданием РЛС ДО. Это обеспечивает высокое качество проектных решений и способствует повышению успешности проектирования в условиях жестких ограничений по стоимости и срокам.

В качестве показателя риска создания РЛС ДО нового поколения в работе [4] обосновано использование вероятности того, что РЛС ДО с требуемыми тактико-техническими характеристиками при заданном объеме финансирования не будет создана к заданному моменту времени, учитывая текущие показатели готовности ее компонентов, а также финансовые и временные ограничения на реализацию проекта. Оценка рисков предполагает расчет данного вероятностного показателя и позволяет,

с одной стороны, прогнозировать эффективность принимаемых решений на всех стадиях проектирования и производства, с другой стороны, осуществлять оперативный контроль за состоянием процесса создания РЛС ДО. При этом исходные данные для оценки рисков могут формироваться различными методами – теоретическими, экспериментальными, а также в результате имитационного моделирования. При выборе наиболее эффективных вариантов реализации проектов сложных технических систем с высоким уровнем новизны исключительно важная роль принадлежит результатам имитационного моделирования и проведения комплекса натуральных экспериментов на стенде Генерального конструктора, являющегося одним из основных инструментов единой платформы проектирования РЛС ДО.

Исходные данные для создания РЛС ДО:

- технические и эксплуатационные характеристики – задаются заказчиком в техническом задании (ТЗ) и определяют набор заданных характеристик создаваемой РЛС ДО $H = (H_1, H_2, \dots, H_L)$, где L – количество заданных характеристик;
- базовая унифицированная структура – определяется Генеральным конструктором и задает базовую структуру создаваемой РЛС ДО с блочно-модульным принципом построения;
- множество функциональных задач F , определяемых в соответствии с декомпозицией создаваемой РЛС ДО по целям и задачам;
- ограничение на общую стоимость (затраты) C_0 при создании РЛС ДО;
- ограничение на сроки (время) t_0 создания РЛС ДО;
- ограничение s_0 на общий уровень технической и технологической новизны создания РЛС ДО, которое определяется Генеральным конструктором как максимально допустимая часть общих затрат, связанных с использованием в проекте новой ЭКБ.

Вариант структуры и переменные задачи. При решении задачи всякий вариант $V = (M_G, M_H, T_H, P_H)$ структуры создаваемой РЛС ДО определяется следующими элементами, выступающими в качестве переменных задачи: M_G – совокупность структурных компонентов (модулей, блоков, комплексов), готовых к использованию в проекте; M_H – совокупность новых структурных компонентов, находящихся в стадии разработки и изготовления; T_H – совокупность новых технологий, находящихся в стадии разработки, необходимых для создания компонентов множества M_H ; P_H – совокупность новых производств, находящихся в стадии создания, необходимых для изготовления компонентов множества M_H .

Оценивание варианта структуры. Каждый вариант структуры создаваемой РЛС ДО необходимо характеризовать с помощью показателей C, S, t, Ψ , зависящих от переменных задачи:

- $C = C(M_G, M_H, T_H, \Pi_H)$ – стоимость варианта;
- $S = S(M_G, M_H, T_H, \Pi_H)$ – значение уровня новизны в варианте;
- $t = t(C, S)$ – срок создания изделия в соответствии с вариантом;
- $\Psi = \Psi(M_H, M_G)$ – множество функциональных задач, реализуемых вариантом структуры.

Показатель и критерий решения задачи. Качество каждого варианта структуры создаваемой РЛС ДО оценивается показателем риска $\rho = \rho(M_H, T_H, \Pi_H)$, при этом критерием качества решения задачи является минимальный риск проектирования ρ .

Формальная постановка задачи. Требуется найти набор структурных и технологических компонентов $M_G^*, M_H^*, T_H^*, \Pi_H^*$, обеспечивающих минимум показателя риска ρ создания РЛС ДО:

$$(M_H^*, M_G^*, T_H^*, \Pi_H^*) = \arg \min_{\substack{M_H \subset \bar{M}_H \\ M_G \subset \bar{M}_G \\ T_H \subset \bar{T}_H \\ \Pi_H \subset \bar{\Pi}_H}} \rho(M_H, T_H, \Pi_H), \quad (1)$$

удовлетворяющий следующим условиям:

$$\begin{aligned} s(M_H^*, T_H^*, \Pi_H^*) &\leq s_0, \\ C(M_H^*, M_G^*, T_H^*, \Pi_H^*) &\leq C_0, \\ t(C(M_H^*, M_G^*, T_H^*, \Pi_H^*), s(M_H^*, T_H^*, \Pi_H^*)) &\leq t_0, \\ \psi(M_H^*, M_G^*) &\supseteq F. \end{aligned} \quad (2)$$

Метод управления созданием РЛС ДО на основе моделей рисков позволяет найти такую совокупность исходных данных, которая обеспечивает минимальное значение риска создания РЛС ДО. При этом комплекс математических моделей рисков создания РЛС ДО как сложных наукоемких технических систем позволяет решать многоуровневые задачи текущего управления процессом создания РЛС ДО на разных стадиях реализации проекта [4].

Стенд Генерального конструктора

Важнейшим элементом автоматизированной системы управления созданием РЛС ДО является стенд Генерального конструктора (СГК), взаимодействующий с САПР через информационную среду управления жизненным циклом создания РЛС ДО. Основной задачей СГК является проведение моделирования, испытаний и полунатурной отработки разрабатываемых структурных компонентов РЛС ДО с целью получения достоверных данных о соответствии их текущих характеристик

значениям, заданным ТЗ и функционально-параметрической матрицей [4].

СГК представляет собой территориально распределенный программно-аппаратный комплекс (ПАК), который основан на блочно-модульной унифицированной архитектуре открытого типа и обеспечивает поэтапную функциональную отработку разрабатываемых структурных компонентов (модулей, блоков, комплексов) создаваемой РЛС ДО на всех этапах реализации проекта, обработку и хранение всей информации, полученной в процессе моделирования, испытаний и экспериментальной обработки. При этом СГК опирается на информационную платформу из текущей, априорной (опыт создания предыдущих РЛС ДО) и прогнозной информации.

В общем случае конфигурация задействованных конструктивных, функциональных и информационных элементов стенда в составе СГК меняется в зависимости от этапа и решаемой задачи конструирования и разработки.

Состав СГК для экспериментальной отработки РЛС ДО, создаваемых по технологии ВЗГ, может иметь вид, представленный на рис. 8.

Основные элементы СГК:

- натуральный имитационно-калибровочный комплекс (НИКК);
- аппаратно-программный комплекс (АПК);
- унифицированный комплексный имитационно-моделирующий стенд (УКИМС).

Автоматизация информационно-логистической поддержки и управления качеством эксплуатации

В настоящее время проблемы обеспечения заданного качества эксплуатации РЛС ДО сводятся в основном к недостаточной эффективности и оперативности инструментов контроля и управления, что требует применения новых методов и технологий. К ним в первую очередь относятся автоматизированная информационно-логистическая поддержка эксплуатации, ресурсосберегающие технологии, прогнозный анализ и управление [5].

Автоматизированная информационно-логистическая поддержка эксплуатации должна опираться на информационную электронную платформу и обеспечивать автоматизированное прогнозное управление качеством эксплуатации и техническим состоянием средств и системы в целом.

Информационная платформа имеет следующий состав:

- электронная база данных по ЭКБ, состоянию систем ремонта, обеспечению ЗИПом и логистике;
- электронная учетная и отчетная эксплуатационно-техническая документация;

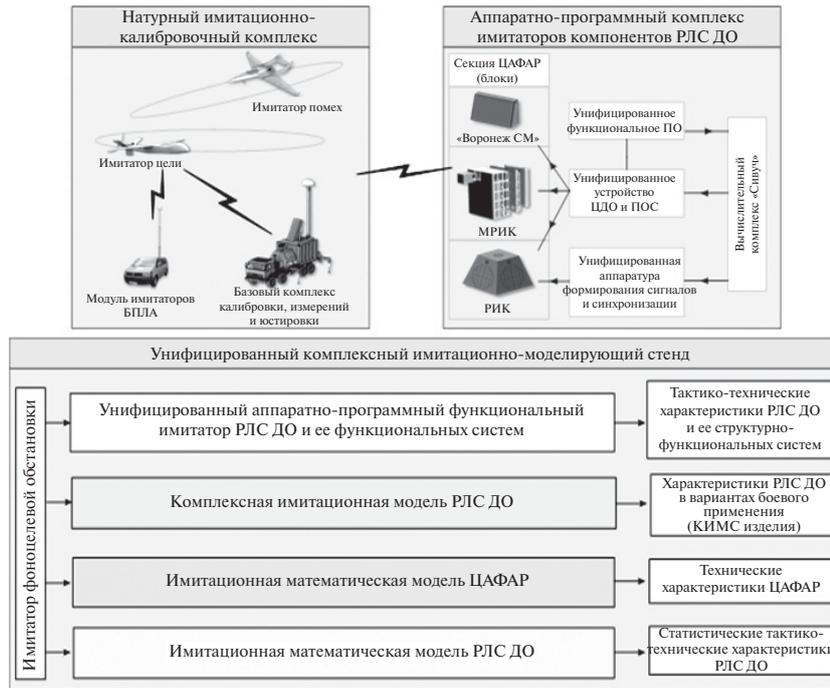


Рисунок 8. Состав стенда Генерального конструктора: ЦДО – цифровое диаграммообразование; МРИК – многофункциональный разведывательно-информационный комплекс; РИК – радиолокационный измерительный комплекс

- динамика отдельных ключевых показателей качества функционирования РЛС;
- динамика отдельных ключевых характеристик, определяющих техническое состояние РЛС в целом;
- формирование регламента адаптивного ТО;
- приоритетные мероприятия сервисного обслуживания и авторского надзора.

Ресурсосберегающие технологии основаны на применении адаптивного (предиктивного) ТО, использовании в системе контроля расчета $K_{ТИ}$, автоматизированном управлении ресурсами и показателями качества функционирования.

В целях реализации автоматизированной информационно-логистической поддержки эксплуатации, применения ресурсосберегающих технологий, прогнозного анализа и управления качеством эксплуатации разрабатываются специализированные комплексы.

Вариант построения такого комплекса представлен на рис. 9.

Метод формирования регламента адаптивного технического обслуживания РЛС ДО

Основным методом технического обслуживания радиоэлектронных средств различного назначения, в том числе РЛС ДО, является регламентированное ТО. Регламентированное ТО РЛС ДО, как правило,

проводится по календарному принципу одновременно на всех аппаратных и аппаратно-программных комплексах РЛС ДО, включая тракты формирования, излучения, приема и обработки радиолокационной информации. ТО РЛС ДО по состоянию используется частично, в основном на резервируемой аппаратуре вычислительного комплекса, когда при отказе одного из резервируемых комплексов производятся устранение безопасного отказа и отдельные настройки, предусмотренные при проведении ТО. В обоих случаях в недостаточной степени учитывается информация от системы встроенного контроля о наиболее критичных параметрах РЛС ДО, а также имеющаяся априорная информация о функционировании РЛС ДО унифицированного ряда.

На рис. 10 представлена схема информационного обмена при реализации адаптивного ТО в РЛС ДО. В основе лежит непрерывный контроль параметров и характеристик технического состояния устройств и комплексов и технических характеристик РЛС ДО, а также экспертных оценок. При снижении уровней контролируемых параметров до определенного порогового значения устройство или комплекс выводятся на плановое ТО. При этом анализируются не только значения параметров и состояние РЛС ДО на текущем временном интервале, но и тренд измеряемых величин, позволяющий прогнозировать приближение контролируемых



Рисунок 9. Вариант построения комплекса

параметров к пороговым значениям и определять время очередного ТО.

Адаптивное ТО радиоэлектронных средств (РЭС) представляет собой комплекс операций по поддержанию требуемых технических характеристик РЭС, основанный на использовании информации об их текущем техническом состоянии по данным встроенного контроля и логико-вероятностных моделей надежности, а также априорной информации о создании и опыте эксплуатации данных и аналогичных РЭС, в том числе предыдущих поколений. При реализации адаптивного ТО РЭС из общего объема проверок и настроек, выполняемых при проведении регламентированного ТО по календарному плану,

исключаются операции по тем характеристикам и параметрам РЭС, значения которых находятся в допустимых пределах. При этом продолжительность ТО $\tau_{ТО}$ и интервал между ТО $\Delta T_{ТО}$ определяются по выбранному показателю надежности (готовности) РЭС. Для РЭС с непрерывным режимом применения в качестве таких показателей могут выступать вероятность безотказной работы или коэффициенты готовности и технического использования, определяемые исходя из текущего технического состояния как отдельных частей РЭС, так и системы в целом [5].

В соответствии с основными задачами, решаемыми адаптивной системой ТО, для реализации адаптивного ТО РЛС ДО требуется разработка

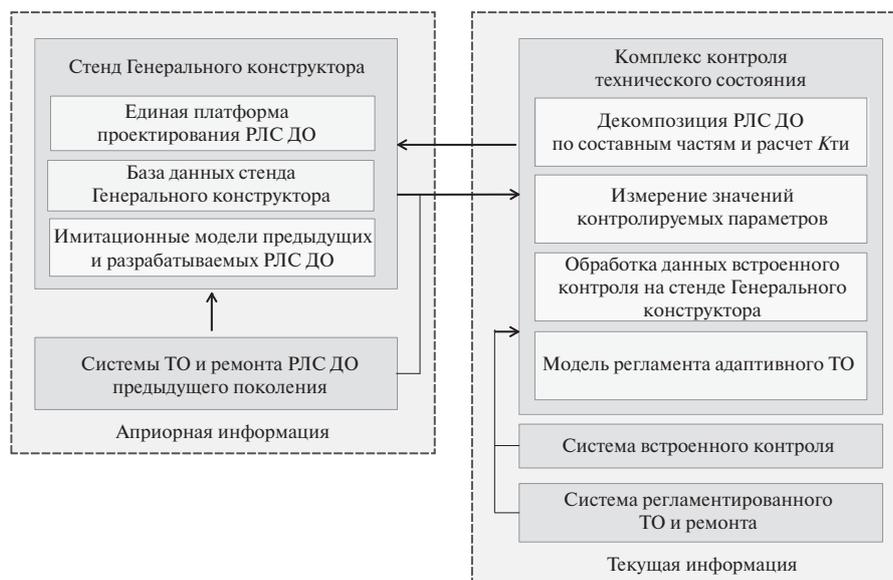


Рисунок 10. Схема организации сбора и анализа информации при адаптивном техническом обслуживании радиолокационных станций дальнего обнаружения

аппаратно-программного комплекса (АПК) планирования со следующими возможностями:

- обработка данных встроенного контроля параметров РЛС ДО и СГК;
- расчет текущего значения коэффициента технического использования $K_{ТИ}$;
- определение оптимального соотношения между параметрами адаптивного ТО $\tau_{ТО}$ и $\Delta T_{ТО}$;
- оценка текущего технического состояния РЛС ДО и выработка решения по определению (корректировке) объемов проводимого ТО.

Модель формирования регламента адаптивного ТО Θ_R должна содержать информацию, определяющую следующие параметры:

- временные параметры P_R^1 – время начала работ по адаптивному ТО после завершения предыдущего ТО $T_{ТО}$ и продолжительность адаптивного ТО $\tau_{ТО}$;
- ресурсные параметры P_R^2 , характеризующие привлекаемые ресурсы: количество обслуживающего персонала $N_{оп}$, количество комплектов средств ТО $N_{ксто}$ и др.;
- структурные параметры P_R^3 , которые характеризуют объем контролируемых параметров технического состояния аппаратуры, перечень работ по ТО A , порядок выполнения работ ТО Q , время выполнения входящих в множество A отдельных работ τ_i , $a_i \in A$, $i = 1, 2, \dots$

Регламент адаптивного ТО в отличие от регламентированного ТО является изменяемым и рассчитывается для каждого очередного ТО в зависимости от текущих значений параметров технического состояния аппаратуры, технических характеристик объекта эксплуатации (в рассматриваемом случае – РЛС ДО) и имеющихся ресурсов U .

Следует отметить, что применительно к адаптивному ТО в отличие от регламентированного ТО термин «периодичность» не применим в явном виде, поскольку меняется время начала выполнения работ по ТО $T_{ТО}$, перечень выполняемых работ A , а также продолжительность выполнения работ $\tau_{ТО}$. Если решение о сроках проведения ТО принимается по результатам оценки и прогноза технического состояния РЛС ДО в некоторый момент времени t_0 , то практический интерес представляет не период проведения ТО $\Delta T_{ТО}$, а интервал времени $T_{ТО}$ от текущего момента времени t_0 до начала ТО. Поэтому для адаптивного ТО РЛС ДО временные параметры P_R^1 целесообразно определять в следующем составе: $\tau_{ТО}$ – время выполнения всех работ (продолжительность) ТО; $T_{ТО}$ – время начала выполнения работ по регламенту проведения ТО.

Время начала выполнения работ по ТО $T_{ТО}$ связано с двумя следующими временными параметрами, которые также характеризуют регламент адаптивного ТО: текущий момент времени t_0 , в который определяется момент формирования регламента адаптивного ТО, и интервал времени до начала Δt , определяемый по результатам оценки и прогноза технического состояния РЛС ДО. Эти временные параметры связаны соотношением $T_{ТО} = t_0 + \Delta t$. Интервал времени $\tau_{ТО}$ характеризует продолжительность проведения ТО, определяемую регламентом, и зависит от совокупности работ A по адаптивному ТО и используемых при их выполнении ресурсов U : $\tau_{ТО}(A, U)$. Очевидно, что если момент времени начала ТО $T_{ТО}^{нач} = T_{ТО}$, то момент времени завершения ТО $T_{ТО}^{кон} = T_{ТО} + \tau_{ТО}$. Если момент времени t_0 соответствует окончанию предыдущего ТО, то $\Delta T_{ТО} = T_{ТО} + \tau_{ТО}$ [6].

Разнообразие ресурсных параметров P_R^2 определяется структурой, составом, элементами системы ТО, в частности обслуживающим персоналом, комплектом средств ТО, комплектом эксплуатационных документов и другими видами ресурсов. Обслуживающий персонал характеризуется численностью (количественный параметр) и уровнем подготовки (качественный параметр). Комплекты эксплуатационных документов и средств технического обслуживания характеризуются количеством, что важно в случаях, когда работы выполняются несколькими расчетами (бригадами). Используемые ресурсы U в общем виде оказывают влияние на время выполнения $\tau_i = \tau(a_i, u_i)$, каждой из отдельных работ a_i , входящих в множество работ A , где u_i – ресурсы, затрачиваемые на выполнение работы a_i , $i = 1, 2, \dots$

Структурные параметры P_R^3 раскрывают содержание и порядок ТО при выбранных значениях временных и ресурсных параметров и связаны с выполнением всех работ по подготовке и проведению ТО в запланированные сроки и в запланированном объеме. Все структурные параметры P_R^3 могут быть объединены в виде плана работ по проведению ТО $\Pi_R = \Pi_R(P_R^3)$. План проведения ТО Π_R представляет собой комплексный объект, формализация которого строится на основе графовой структуры. План Π_R проведения работ по адаптивному ТО увязывает множество работ A , выполняемые пункты руководства по эксплуатации Q и используемые ресурсы U так, что всякая работа a_i плана Π_R характеризуется временем ее выполнения $\tau_i = \tau(a_i, u_i)$.

Объединяя рассмотренные элементы описания регламента, формальную модель регламента адаптивного ТО РЛС ДО целесообразно записать в виде трехкомпонентного кортежа

$$\Theta_R = \langle P_R^1, P_R^2, \Pi_R \rangle. \quad (3)$$

Учитывая то, что все элементы кортежа (3) являются многокомпонентными, это порождает многообразие всевозможных вариантов регламента, каждый из которых обеспечивает определенное значение коэффициента технического использования $K_{ТИ}$. Поэтому формирование регламента адаптивного ТО РЛС ДО, обеспечивающего максимизацию выбранного показателя, в частности коэффициент технического использования $K_{ТИ}$, целесообразно организовать на основе построения и анализа альтернативных вариантов регламента. При этом решаются следующие основные задачи: определение времени начала работ; формирование плана выполнения работ и определение продолжительности адаптивного ТО; формирование альтернативных вариантов регламента адаптивного ТО и выбор варианта регламента, соответствующего достижению максимального значения коэффициента технического использования $K_{ТИ}$.

Организация адаптивного ТО для заданной структуры РЛС ДО предполагает нахождение варианта проведения ТО V_R – сочетания параметров ТО, которое обеспечит максимум коэффициента технического использования $K_{ТИ} = K_{ТИ}(t, \Theta_R, V_R)$ в течение всего периода эксплуатации РЛС ДО на основе модели ее надежности при ограничении на значение вероятности безотказной работы $P(t) = P_b(t)$ и ресурса U . Вариант проведения ТО V_R в общем случае характеризуется определенными для вектора параметров технического состояния РЛС ДО X временными и ресурсными параметрами ТО $V_R = V_R(\Delta T_{ТО}, \tau_{ТО}, U, X)$. Тогда оптимальный вариант проведения адаптивного ТО V_R^* , характеризуемый временными параметрами $\Delta T_{ТО}$ и $\tau_{ТО}$, который обеспечивает максимум коэффициента технического использования $K_{ТИ}$, может быть формально определен в следующем виде:

$$V_R^* = \arg \max_{\Delta T_{ТО}, \tau_{ТО}} K_{ТИ}[t, \Theta_R, V_R(\Delta T_{ТО}, \tau_{ТО}, U, X)] \left| \begin{array}{l} P(t) \geq P_{bmin} \\ U \leq U_0 \\ A \in A_0 \end{array} \right. \quad (4)$$

где P_{bmin} – минимально допустимое значение вероятности безотказной работы РЛС ДО, U_0 – ограничение на ресурсы при проведении ТО РЛС ДО, A_0 – запланированная совокупность работ по проведению ТО. От параметров U и A , на которые в выражении (4) накладываются ограничения $U \leq U_0$ и $A \in A_0$, зависит продолжительность проведения ТО $\tau_{ТО} = \tau_{ТО}(A, U)$.

Использование принципа Парето применительно к рассматриваемой задаче приводит к выделению из множества вариантов регламента проведения адаптивного ТО V_R^* , оптимальных по критерию максимума коэффициента технического использования $K_{ТИ}$, множества предпочтительных по Парето вариантов $V_{R пар}^*$. При этом любой из вариантов регламента множеств V_R^* и $V_{R пар}^*$ обеспечивает максимизацию $K_{ТИ}$, но использование предпочтительных вариантов направлено на уменьшение ресурсов, необходимых для выполнения адаптивного ТО. В результате происходит существенное сокращение количества вариантов регламента, которые необходимо проанализировать для определения оптимального – теперь он выбирается из множества $V_{R пар}^*$ [7].

В общем виде рассмотренная методика формирования регламента адаптивного ТО РЛС ДО представлена на рис. 11.

Опыт применения новых методов и технологий при создании и эксплуатации РЛС ДО (проект «Воркута»)

При создании РЛС ДО нового поколения (проект «Воркута») были учтены разработанные новые методы и технологии:

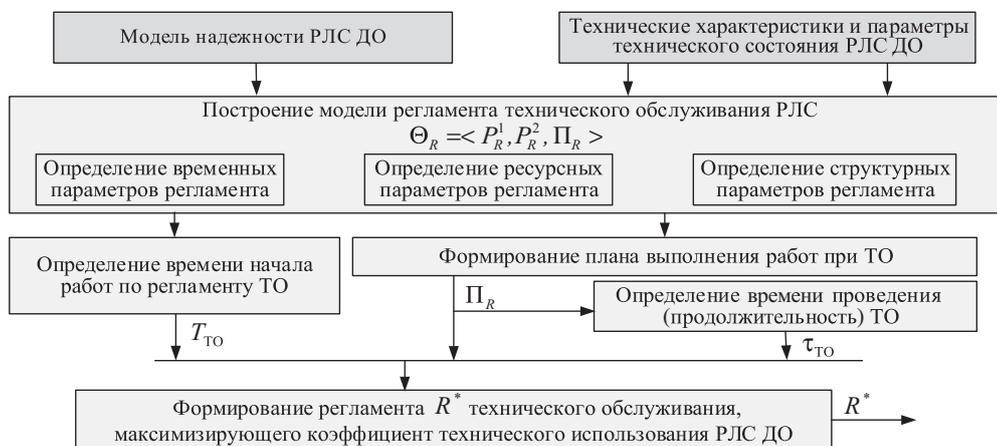


Рисунок 11. Методика формирования регламента адаптивного технического обслуживания радиолокационных станций дальнего обнаружения

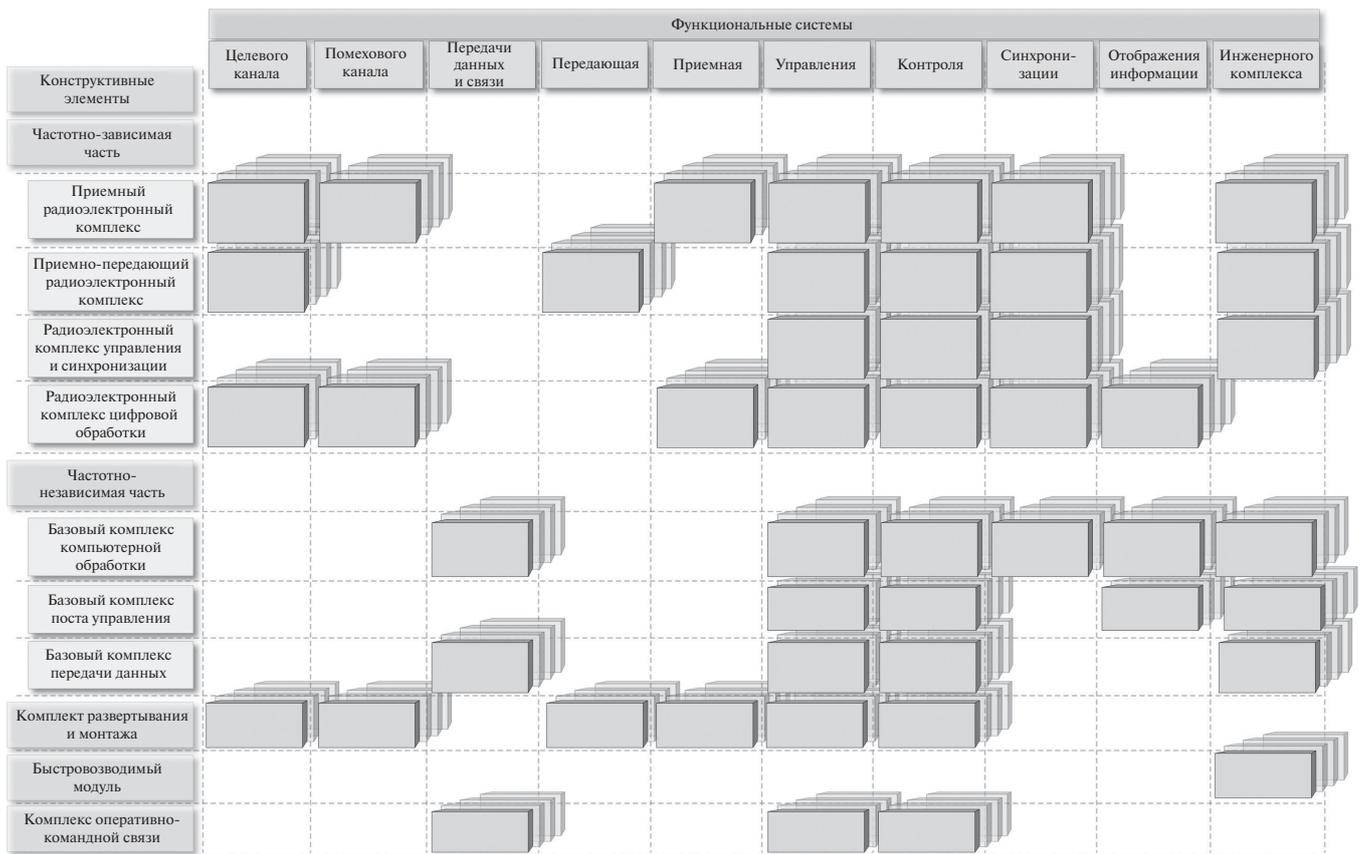


Рисунок 12. Функционально-конструктивная матрица радиолокационных станций дальнего обнаружения

- переход к функционально-блочной структуре РЛС ДО унифицированного ряда на базе многоканальных РЭК (рис. 12);
- отработка компонентов РЛС на стенде Главного конструктора (СГК);
- наличие встроенной системы контроля технического состояния РЛС и ее компонентов.

Наряду с этим, были применены новые методы и технологии организации эксплуатации РЛС ДО нового поколения:

- прогнозное обеспечение работоспособного состояния РЛС в течение срока эксплуатации с учетом остаточного ресурса;
- рост объема регистрируемой информации системы встроенного контроля (число цифровых компонентов достигает 50 тысяч);
- переход к стратегии технического обслуживания по состоянию (адаптивное ТО).

Таким образом, разрабатываемые коллективом ученых и специалистов в рамках научной школы С.Ф. Боева и А.А. Рахманова методы и технологии создания и эксплуатации РЛС ДО получили

дальнейшее развитие, находят свое практическое применение и являются перспективными.

Заключение

Существующая система создания и эксплуатации РЛС ДО не автоматизирована и не использует в полной мере инновационные подходы, методы и технологии, что приводит к значительным ресурсным затратам. В рамках научной школы С.Ф. Боева и А.А. Рахманова разработан ряд перспективных инструментов автоматизированного контроля и управления полным жизненным циклом РЛС ДО. В целях оптимизации ресурсов и обеспечения длительного работоспособного состояния информационных средств систем РКО требуется развитие полученных результатов:

- внедрение в практику создания РЛС ДО новых технологий, моделей и методов, в основу которых положено применение ЕПП, СГК, моделей риска и прогнозного управления процессами;
- создание комплексов и систем автоматизированной информационно-логистической поддержки и эксплуатации;

- создание единого электронного каталога ЭКБ для всех РЛС ДО;
- формирование единого информационного пространства по вопросам создания и эксплуатации систем, оснащенных РЛС ДО, для обеспечения контроля и управления всеми процессами со стороны генеральных конструкторов этих систем и служб заказчика, ответственных за эксплуатацию;
- внедрение методов прогнозного управления техническим состоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротинин Е. С., Подгорных Ю. Д. Системотехника в построении комплексов вооружения и системы предупреждения о ракетном нападении. М.: МВИРЭ КВ, 2009.
2. Боев С. Ф., Рахманов А. А., Слока В. К. Система модульно-параметрического проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения нового поколения ОАО «РТИ» // История отечественной радиолокации / под ред. С. В. Хохлова. М.: Столичная энциклопедия, 2015. С. 561–578.
3. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. М.: Радиотехника, 1978. 608 с.
4. Боев С. Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 430 с.
5. Линкевичиус А. П., Боев С. Ф. Контроль и управление техническим состоянием крупноапертурных АФАР на основе данных встроенного контроля и системы управления жизненным циклом // Нелинейный мир. 2016. Т. 14. № 5. С. 17–22.
6. Линкевичиус А. П., Мальцев Г. Н., Склемин Д. В. Определение параметров регламента проведения технического обслуживания радиоэлектронной системы с учетом требований к ее безотказности и готовности // Нелинейный мир. 2016. Т. 14. № 7. С. 3–10.
7. Система адаптивного технического обслуживания РЛС ДО нового поколения на основе оптимизации коэффициента технического использования / В. М. Антошина, А. С. Логовский, С. С. Матвеева, А. П. Линкевичиус // Нелинейный мир. 2017. Т. 15. № 4. С. 9–16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Боев Сергей Федотович, д. т. н., д. э. н., доцент, генеральный директор, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Рахманов Александр Алексеевич, д. т. н., профессор, заместитель генерального директора, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Линкевичиус Александр Павиласа, д. т. н., начальник центра, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, e-mail: linkevicius@mail.ru.

Якубовский Сергей Владимирович, д. т. н., доцент, начальник отдела, НИИЦ (г. Москва), ЦНИИ ВКС МО РФ, Российская Федерация, 129345, Москва, Осташковская ул., д. 12а, e-mail: syakubovskiy@mail.ru.

Володин Павел Владимирович, начальник отдела, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, e-mail: vimpel@vimpel.ru.

For citation: Boev S. F., Rakhmanov A. A., Linkevicius A. P., Yakubovskiy S. V., Volodin P. V. Creation and operation of long-range detection radar. Issues of radio electronics, 2020, no. 5, pp. 35–48. DOI 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48

S. F. Boev, A. A. Rakhmanov, A. P. Linkevicius, S. V. Yakubovskiy, P. V. Volodin

CREATION AND OPERATION OF LONG-RANGE DETECTION RADAR

The purpose of the article is to substantiate the need for and brief description of certain modern approaches, methods and technologies for creating and operating long-range detection radars (LRD radars). A method for managing the creation of LRD radars based on risk models is proposed, which allows to find the optimal set of hardware, functional and software solutions. The possibility and experience of application of the General designer's stand in the automated control system for the creation of LRD radars is shown. A variant of building a complex of automated information and logistics support for operation is proposed. A method and algorithm for calculating indicators of adaptive maintenance regulations have been developed. The experience of the application of new methods and technologies in the creation and operation of radars of the Vorkuta project is presented. Conclusions are drawn about the need to develop the results obtained in order to optimize resources and ensure a long operational state of the information tools of space-rocket defense systems.

Keywords: operation system, minimum average risk criterion, unified design platform, General designer's stand, adaptive maintenance

REFERENCES

1. Sirotnin E. S., Podgornykh J. D. *Sistemotekhnika v postroyenii kompleksov vooruzheniya i sistemy preduprezhdeniya o raketnom napadenii* [Systems engineering in the building of weapon systems and the system of missile warning]. Moscow, MVIRES KV Publ., 2009. (In Russian).

2. Boev S.F., Rakhmanov A.A., Sloka V.K. System of model-parametric design of long-range detection radar stations of a new generation. In: Khokhlov S.V., editor. *Istoriya otechestvennoy radiolokatsii* [History of Russian radar]. Moscow, Stolichnaya encyclopedia Publ., 2015, pp. 561–578. (In Russian).
3. Dulevich V.E., editor. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* [Theoretical foundations of radar]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 1978, 608 p. (In Russian).
4. Boev S.F. *Upravleniye riskami proyektirovaniya i sozdaniya radiolokatsionnykh stantsiy dal'nego obnaruzheniya* [Managing the risks of designing and creating long-range detection radar stations]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 430 p. (In Russian).
5. Linkevicius A.P., Boev S.F. Control and management of the technical condition of large-aperture AFARs based on data from the built-in control and life cycle management system. *Nelineynyy mir*, 2016, vol. 14, no. 5, pp. 17–22. (In Russian).
6. Linkevicius A.P., Maltsev G.N., Sklemin D.V. Determination of the parameters of the rules, maintenance of electronic system in accordance with the requirements for its reliability, and readiness. *Nelineynyy mir*, 2016, vol. 14, no. 7, pp. 3–10. (In Russian).
7. Antoshina V.M., Logovskiy A.S., Matveeva S.S., Linkevicius A.P. The adaptive maintenance of the radar TO the new generation based on the optimization of the coefficient of technical use. *Nelineynyy mir*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 9–16. (In Russian).

AUTHORS

Boev Sergey, D. Sc., assistant professor, general director, MAC Vimpel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Rakhmanov Aleksandr, D. Sc., professor, deputy general director, MAC Vimpel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Linkevicius Alexander, D. Sc., deputy general director, MAC Vimpel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, e-mail: linkevichius@mail.ru.

Yakubovskiy Sergey, D. Sc., assistant professor, head of department, Scientific and Research Center for Missile and Space Defense of the Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 12A, Ostashkovskaya St., Moscow, 129345, Russian Federation, e-mail: syakubovskiy@mail.ru.

Volodin Pavel, head of department, MAC Vimpel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, e-mail: vimpel@vimpel.ru.