

УДК 621.353

Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов

Будко П. А., Винограденко А. М., Меженев А. В., Чикирев А. А.

Актуальность: Разработка способа и устройства интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов. Повышение оперативности процедуры контроля и доведение его до режима реального времени. **Постановка задачи:** поиск новых способов экспресс-диагностики состояния сложных технических систем с высокой ценой отказа на примере системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома авиационного формирования. **Целью работы** является введение понятия интеллектуального экспресс-контроля, как составного элемента экспресс-диагностики, а также разработка способа для его реализации на радиотехнической системе. При этом под экспресс-контролем в работе понимается определение вида технического состояния объекта по ограниченному числу контролируемых параметров в реальном масштабе времени или близком к нему. **Используемые методы:** процесс проведения экспресс-контроля раскрыт на примере диагностирования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома методами неразрушающего контроля с представлением варианта построения территориально-распределенного поля значений параметров качества объекта контроля. **Новизна:** процедура экспресс-контроля осуществляется с применением не только штатного воздушного судна-лаборатории, применяемого в настоящее время с периодичностью два раза в год в авиационном формировании, но и других доступных летно-подъемных средств на базе беспилотных летательных аппаратов самолетного или квадрокоптерного типа, а также обычных гражданских и военных воздушных судов, оснащенных бортовыми автоматизированными измерительными комплексами, укомплектованными сменными измерительными модулями для решения задачи дистанционного экспресс-контроля наземного оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома. **Результат:** Способ интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов состоит: из подготовительного этапа, осуществляемого на земле и включающего подготовку исходных данных для проведения процесса телеизмерений и укомплектование бортового автоматизированного измерительного комплекса под решаемые задачи; первого этапа проведения процесса телеизмерений бортовым автоматизированным комплексом в ходе летной проверки, при котором в случае обнаружения отказа или предотказного состояния средства связи или радиотехнического обеспечения, транслируется сигнал аварии в наземный автоматизированный измерительный комплекс; второго этапа, заключающегося в проведении процесса идентификации отказа наземным автоматизированным измерительным комплексом с привлечением объектовых систем контроля средств связи и радиотехнического обеспечения; завершающего этапа способа, включающего актуализацию базы знаний (базы состояний) автоматизированной системы контроля и формирования различных видов отчетов проведенного экспресс-контроля. Разработаны структурная и функциональная схемы устройства, реализующего способ интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов, а также внешний вид конструктива пульта оператора автоматизированной системы контроля группы руководства полетами. **Практическая значимость:** использование автоматизированного измерительного комплекса на беспилотном летательном аппарате при проведении интеллектуального экспресс-контроля. Сокращение экономических затрат и других видов ресурсов в ходе летной проверки. Доведение периодичности летных проверок до режима реального времени – мониторинга.

Ключевые слова: экспресс-диагностирование, интеллектуальный экспресс-контроль, автоматизированный измерительный комплекс, летная проверка, идентификация отказа.

Библиографическая ссылка на статью:

Будко П. А., Винограденко А. М., Меженев А. В., Чикирев А. А. Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108.

Reference for citation:

Budko P. A., Vinogradenko A. M., Mezhenov A. V., Chikirev A. A. Method and equipment of the intelligent express control of the technical condition of ground-based means of communication and radio-technical flight support. Systems of Control, Communication and Security, 2020, no. 1, pp. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108 (in Russian).

Введение

Возросшие скорости воздушного движения современных летательных аппаратов и динамика изменения условий функционирования работы бортовых и наземных средств радиотехнического обеспечения (РТО) полетов, а также высокие вероятности воздействий различных случайных и преднамеренных дестабилизирующих факторов (ДФ) естественного и искусственного характера на систему связи (СС) и РТО, как открытую, распределенную, динамическую, вероятностную и сложную эргатическую (человеко-машинную) систему, диктуют ужесточение требований по поддержанию её в готовности к немедленному использованию по назначению, сокращению времени простоя и повышению оперативности выполнения мероприятий технического обеспечения связи и автоматизации.

Одним из подходов, повышающим оперативность проведения мероприятий технического диагностирования (в частности, контроля технического состояния), по мнению авторов должен стать «экспресс-контроль» (ЭК) технического состояния (ТС), понятийный аппарат которого в отношении СС и РТО полетов приведен в [1]. В продолжение данного исследования предложен способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи (СрС) и РТО полетов авиационного формирования (АФ).

В работе процесс проведения экспресс-контроля раскрыт на примере диагностирования СрС и РТО с представлением варианта построения территориально-распределенного поля значений параметров качества объекта контроля (ОК) [1, 2], получаемого с использованием методов неразрушающего контроля и применением доступных лётно-подъемных средств (ЛПС). При этом вид ТС средств связи и РТО в процессе ЭК определяется нахождением контролируемых параметров в пределах установленных интервалов допусков для конкретного типа радиоэлектронных средств [3, 4]. В работе предлагается в подсистеме ЭК наряду с эксплуатационными допусками на контролируемые параметры использовать также и профилактические допуски [5, 6], адаптируемые к внутренним и внешним условиям функционирования системы. При этом порядок определения профилактических допусков осуществляется как с использованием классического подхода – для двухпараметрического пространства, так и в зависимости от числа включенных эксплуатационных параметров в процедуру ЭК – для многопараметрического пространства ОК [3].

Предлагаемый способ интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов может использоваться для осуществления в режиме реального времени лётных настроек и проверок наземных средств связи и РТО, например, радиомаячных систем (РМС) обеспечения инструментального захода воздушных судов на посадку, а также приводных аэродромных радиостанции, средств авиационной радиосвязи и светосигнального оборудования, таких как:

- курсовой радиомаяк (КРМ);
- глиссадный радиомаяк (ГРМ);

- ретранслятор дальногомера (для РМС дециметрового диапазона*);
- маркерные радиомаяки (МРМ) дальнего (ДПРМ) и ближнего (БПРМ) приводных радиомаркерных пунктов аэродромов и гидродромов, а также отдельных приводных радиомаркерных пунктов (ОПРМ) вертодромов и вертолетных площадок (для РМС метрового диапазона**);
- радионавигационные системы (РНС): азимутальный (РМА) и дальномерный (РМД) радиомаяки систем ближней навигации (РСБН);
- автоматический радиопеленгатор (АРП);
- светосигнальное оборудование (ССО);
- приводные аэродромные радиостанции (ПАР) ДПРМ, БПРМ, ОПРМ;
- радиосредства командно-диспетчерского пункта (КДП), обеспечивающие как каналы авиационной радиосвязи (разных диапазонов волн), так и связь оперативного управления и взаимодействия с единым центром управления воздушным движением и различными наземными службами аэродрома, см. рис. 1.

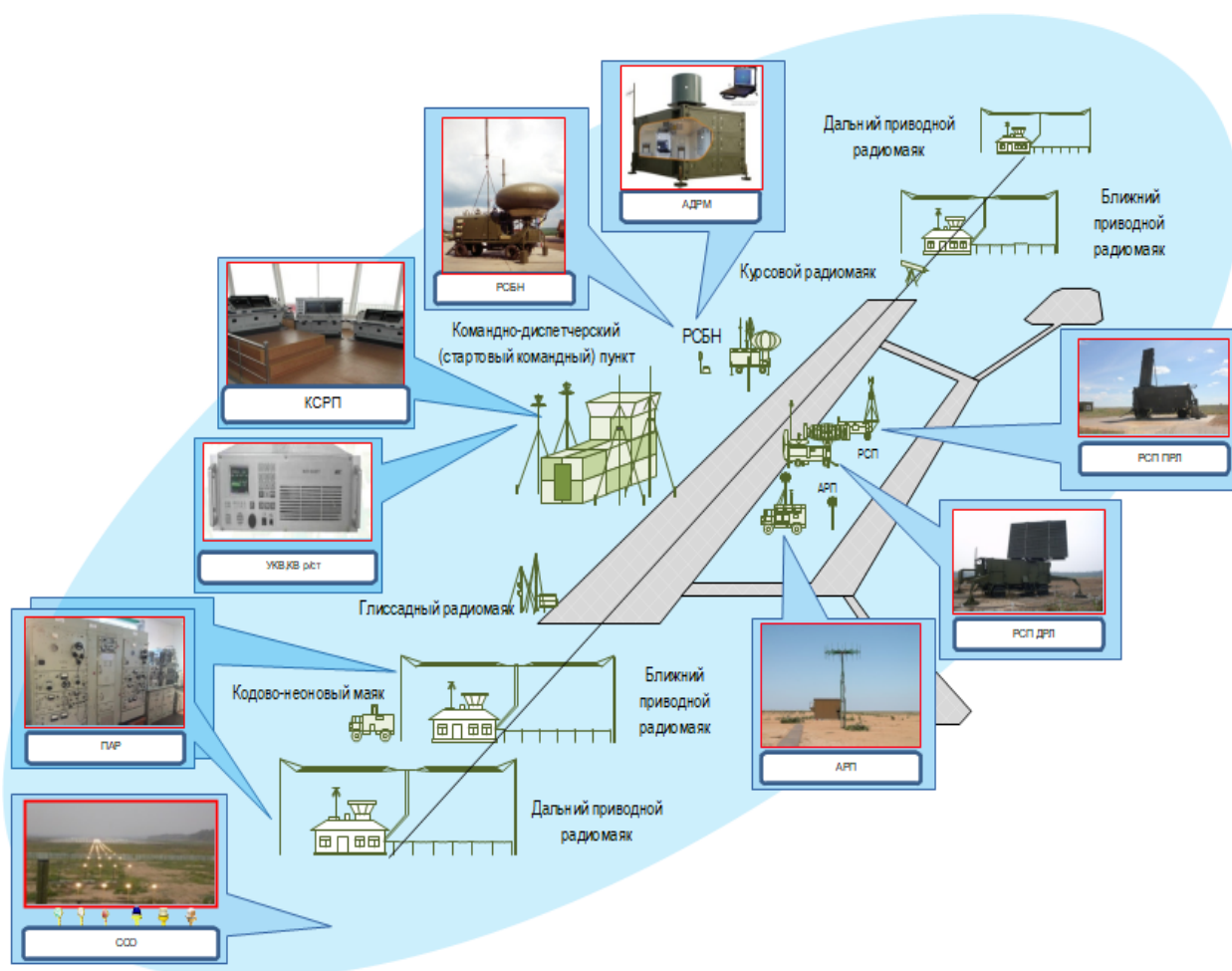


Рис. 1. Система связи и РТО аэродрома авиационного формирования (вариант)

*Регранный дальномера, как правило, совмещается с КРМ, образуя дальномерно-курсовой радиомаяк (ДКРМ).

^{**}В качестве дальнего и ближнего маркерных радиомаяков РМС допускается использовать маркерные радиомаяки ДПРМ и БПРМ.

Анализ предметной области

Из практики эксплуатации средств связи и РТО аэродромов как гражданского, так и военного назначения известны работы [7-10] описывающие общий порядок проведения летных настроек и проверок наземного радиотехнического оборудования для подтверждения выходных характеристик на основных этапах их жизненного цикла (в процессе эксплуатации и в некоторых специальных случаях). Общие методики летных проверок, а также их объем и периодичность изложены в Федеральных авиационных правилах [7]. При этом в качестве метрологического метода для проверки РМС посадочной радиомаячной группы (ПРМГ) используется метод, включающий в себя наземные угломерные измерения координат траектории полета самолета с высокой точностью с помощью оптических приборов. При проверках РМА/VOR, РМД/DME и РСБН и АРП используется метод опорных точек, включающий в себя определение координат воздушного судна в моменты пролета над заданными точками с известными географическими координатами на земной поверхности (наземными ориентирами). В настоящее время для реализации целей летных проверок наземных средств РТО полетов, как правило используют специальное воздушное судно-лабораторию (ВСЛ), на котором установлены измерительные приемники и УКВ связная радиостанция, в диапазоне которой работает АРП. При этом измерение координат воздушного судна осуществляется оптическим устройством и одновременно с этим при работе радиотехнических средств установленными на борту воздушного судна бортовыми приемниками формируются радионавигационные измерительные сигналы. Далее осуществляется совместная обработка сигнала с выхода оптического устройства и измерительного сигнала. Результаты измерений и совместной обработки сигналов отображаются и регистрируются.

Основным недостатком данного способа летных настроек и проверок является необходимость применения специализированного ВСЛ. Это обуславливает большие затраты и соответственно высокую стоимость данных работ. Также применение ВСЛ не позволяет оперативно контролировать выходные характеристики РМС, РНС и АРП в период между плановыми проверками, в процессе длящейся летной смены, а также делает недоступным его применение при проведении научно-исследовательских работ и в учебном процессе.

Одним из альтернативных вариантов осуществления летных проверок является использование вместо воздушного судна-лаборатории беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Так в работе [8] описывается способ оценки характеристик зенитно-ракетных систем (ЗРС) с привлечением БПЛА в качестве летно-подъемных средств обеспечения облетов радиолокационных станций ЗРС, значительно повышающий оперативность контроля и проверку их работоспособности в режимах, определенных тактико-техническими характеристиками (ТТХ), а также снижающий стоимость проведения испытаний. При этом аппаратуру командной радиолинии управления и антенну для приема команд и данных от пункта боевого управления вместе с системой радиотелеметрических датчиков и бортовым радиотелеметрическим ответчиком размещают на БПЛА в качестве полезной нагрузки. БПЛА осуществляет облет радиолокационных

станций ЗРС по заранее установленным маршрутам на фиксированных азимутах и высотах, в ходе данной процедуры оценивают параметры зоны обнаружения и других характеристик РЛС: дальность обнаружения на заданной высоте, минимальную дальность обнаружения, верхняя граница по высоте, верхняя граница по углу места, нижняя граница по углу места.

Для качественного проведения летной проверки выполняют порядка 15 заходов (облетов) на выбранной высоте [9], оценивают параметры зоны радиоканала «земля-борт» зенитной управляемой ракеты (ЗУР), оценивают основные характеристики головки самонаведения (ГСН) и радиовзрывателя (РВ).

Однако недостатком способа оценки характеристик ЗРС является то, что он направлен, в основном на оценку характеристик ЗУР, ГСН, РВ и их каналов управления на траектории полета, а не на оценку состояния наземного оборудования.

Наиболее приемлемым по технической сущности и эффективности применения к предлагаемому в статье способу, является способ летных проверок наземных средств РТО полетов [10]. Данный способ заключается в том, что в качестве наземных радиотехнических средств (РТС) используют курсовые, глиссадные, маркерные радиомаяки, азимутальные и дальномерные радионавигационные маяки, автоматические радиопеленгаторы, а в качестве воздушного судна (ВС) для летной проверки упомянутых средств применяют БПЛА. В ходе летной проверки оптическим или иным высокоточным устройством измеряют координаты БПЛА. Одновременно при работе упомянутых РТС установленными на БПЛА бортовыми приемниками формируют радионавигационные измерительные сигналы, которые кодируют и излучают в свободное пространство. Данные сигналы принимают на Земле радиоприемными устройствами (РПУ), декодируют и совместно с сигналами с выхода оптического устройства обрабатывают. После чего осуществляют отображение и регистрацию результатов измерений (окончательных итогов совместной обработки сигналов).

В тоже время к недостаткам данного способа можно отнести:

- большой расход канального ресурса, связанного с высокой загрузкой каналов воздушной радиосвязи в процессе проведения процедуры контроля. При этом вся доступная измерительная информация (ИИ), снимаемая с подконтрольного средства РТО, независимо от ее отнесения к аварийным или нормальным режимам функционирования передается в направлении «борт-земля» до наземного КДП аэродрома, что в целом повышает полноту контроля, однако влияет на снижение оперативности летной проверки;
- способ ориентирован на проведение контроля только средств РТО радиомаячных систем (РМС) обеспечения инструментального захода воздушных судов на посадку без контроля технического состояния радиостанций аэродрома. Это влечет за собой ситуацию, когда значительное число приводных аэродромных радиостанций, работающих в режимах «привод» и «связь», остаются безконтрольными: ПАР, размещаемые на позициях средств РТО радиомаячной группы (РМГ); радиосредства КДП, обеспечивающие каналы воздушной радиосвязи, а

также связь оперативного управления и взаимодействия разных служб аэродрома АФ;

- отсутствие канала обратной связи «земля-борт» для осуществления контроля настроек (регулировок) аварийного оборудования связи и РТО в режиме реального времени при переходах на резервные комплекты средств связи и РТО и обратно.

В качестве технических решений, реализующих способы летных проверок можно отметить устройства, описанные в [10-12]. Так известно устройство летной проверки курсовых, глиссадных, маркерных, радиомаяков [11]. Недостатком данного устройства является то, что в его состав включено воздушное судно-лаборатория, что обуславливает большие эксплуатационные затраты летных проверок.

В работе [12] описывается устройство для летной проверки азимутальных и дальномерных радионавигационных маяков. При этом данное устройство включает ВСЛ с размещаемыми на его борту УКВ передатчиком (радиостанцией) и оптическим прибором определения момента пролета ВСЛ над ориентирами с известными географическими координатами.

Из анализа применимости устройств проведения летных проверок наземного оборудования РТО наиболее близким по технической сущности к предлагаемому является устройство для осуществления способа летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов [10].

Несмотря на большое число измерений в ходе летной проверки, данное устройство не охватывает такие наземные элементы СС и РТО как средства связи (приводные аэродромные радиостанции и группу радиосредств КДП различных диапазонов волн). Так же к недостаткам устройства можно отнести большой объем транслируемой измерительной информации с борта БПЛА на Землю, низкую оперативность летной проверки в связи с необходимостью доведения на Землю всей доступной ИИ независимо от технического состояния СрС и РТО, а также отсутствие канала обратной связи «земля-борт» для осуществления контроля настроек (регулировок) аварийного оборудования связи и РТО в режиме реального времени при переходах на резервные комплекты средств связи и РТО в ходе летной проверки.

Жесткость требований руководящих документов по безопасности полетов и современных нормативов по экологии, а также категоричность мнения общественности о необходимости исключения техногенных катастроф и аварий на космической и авиационной технике, происходящих с частотой 600-700 в год [13] с человеческими жертвами и огромным ущербом для окружающей среды, делает проблему поддержания надежности [14] и безопасности сложных технических систем наземных и бортовых авиационных комплексов *актуальной*.

Цель статьи: разработка способа и устройства интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и РТО полетов, обеспечивающих повышение оперативности процедуры контроля и доведение его до режима реального времени или близкого к нему, в том числе в процессе проведения регулировок и перехода на резервные комплекты средств связи и РТО и обратно, а также расширение перечня контролируемых средств связи и РТО аэродрома,

практически до всех свето- и радиоизлучающих средств, в зависимости от комплектации метрологического оборудования бортового автоматизированного измерительного комплекса (АИК).

Понятие интеллектуализации в системах контроля и диагностики

Интеллектуализация функций контроля элементов системы связи и РТО в статье осуществляется за счет использования базы знаний (БЗ), входящей в структуру системы. Сама по себе БЗ является распределенной, размещаемой:

- в бортовом автоматизированном измерительном комплексе летно-подъемного средства, привлекаемого к проведению процедуры экспресс-контроля;
- наземном АИК командно-диспетчерского пункта аэродрома;
- объектовых АИК на позициях развертывания СрС РТО.

В базе знаний (базе состояний) содержится информация о возможных технических состояниях элементов СС и РТО, предаварийных пороговых значениях критически важных контролируемых параметров, а также способах (алгоритмах) решения различных аварийных ситуаций, составляющих базу правил. С учетом этого проверка работоспособности СС и РТО осуществляется поэлементно и в случае обнаружения неработоспособного элемента (СрС или средства РТО), применяется инструментарий базы знаний (базы состояний) по данной ситуационной задаче, например, осуществляется переход на резервные полуконкомплекты РТО или выполняются различного рода регулировки с последующей проверкой функционирования РТС в режиме реального времени.

Особенностью функционирования системы интеллектуального контроля технического состояния СрС и РТО является степень их неоднородности (гетерогенности), а также различия в физической сущности процедуры контроля (средств связи, средств РТО полетов, светосигнального оборудования) по параметрам, диапазонам излучения, методам приема и инструментам обработки ИИ, «производительности» контроля и пр. Данные факторы являются определяющими в выборе того или иного решения, определении метода оценивания в рамках контроля с использованием базы знаний, с учетом многокритериальности оценки условий, в которых находятся контролируемые СрС и РТО.

Рассматривая СрС и РТО как объекты контроля необходимо отметить, что причинами как внезапных, так и постепенных отказов в них являются, воздействие внутренних (производственные дефекты, деградиационные процессы внутри элементов, и пр.) и внешних (климатические условия эксплуатации, электромагнитные сторонние воздействия, ошибки персонала и др.) дестабилизирующих факторов. Обычно предполагается, что ДФ воздействуют на ОК и вызывают возникновение неисправностей, характеризуемых изменяющимися в них параметрами, которые при диагностировании оцениваются методами параметрической идентификации [3, 6, 15-17]. В технической диагностике такое направление основано на восстановлении модели диагностируемого ОК [3, 16]. Кроме этого, большинство ДФ приводит к изменению не только параметров модели ОК, что обуславливает применение методов непараметрической идентификации, при построении его математической модели с использованием ре-

результатов натурных и вычислительных экспериментов. В связи с этим расширение диапазонов характеристик и номенклатуры средств измерений позволяет осуществлять контроль и изучение других параметров СрС и РТО, которые не могут быть исследованы с использованием традиционных математических методов обработки измерительных сигналов в системах дистанционного контроля, либо применение этих методов ограничивается возможностями средств регистрации измерительной информации.

Для реализации данного функционала в предложенном способе и устройстве интеллектуального экспресс-контроля наземных СрС и РТО, находящихся в различных стадиях развития аварийной ситуации, для оценивания текущего ТС осуществляется выбор соответствующего математического аппарата: искусственные нейронные сети (ИНС) или вейвлет-преобразования (ВП) [18-21]. При этом система должна сама определить применимость необходимого инструмента обработки измерительной информации.

Таким образом, назначение моделируемых систем [22], реализующих способ интеллектуального экспресс-контроля заключается в решении задач обнаружения, распознавания и идентификации отказов в ОК с использованием интеллектуальных датчиков (приемников ИИ в радио- и оптическом диапазоне излучений), выделении опасных трендов развития аварийных ситуаций, ведении их оперативного каталога, прогнозирования отказов, формирования и принятия в бортовом либо наземном АИК мер по реализации действенного «барьера безопасности» на основе всесторонней оценки обстановки. Причем актуальным является обеспечить указанный функционал в реальном масштабе времени [23] (или в режиме мягкого реального времени) в автоматическом/автоматизированном режиме функционирования СС и РТО полетов.

Под «барьером безопасности» здесь понимается предотвращение или замедление развития аварийной ситуации, реализуемое конструктивной характеристикой, физическим свойством или технологическим устройством, например, аварийного включения резерва. Эффективность «барьера безопасности» оценивается в пространстве параметров средств связи и РТО, характеризуя его надежность, и может быть выражено критическими классами технического состояния средств связи и РТО.

Для реализации решающего правила, определяющего выбор соответствующего инструмента (ИНС или ВП), согласно базы знаний (базы правил) является степень неоднородности ОК, определяемая по шкале от 0 до 1. Наиболее подходящий математический аппарат, в зависимости от степени неоднородности, определяется методом экспертных оценок (метод бинарных сравнений). Для однородного оборудования РТО (ОК), типа ПАР, или ССО и пр. такая степень неоднородности имеет величину от 0 до 0,6, а процедура оценивания ТС основана на работе искусственных нейронных сетей. Это объясняется высокой степенью унификации, «схожести» контролируемых узлов и механизмов, а также тем, что фиксируемый поток измерительной информации характеризуется свойствами стационарности. Процесс изменения ТС в однородных СрС и РТО более плавный, что способствует относительно высокой эффективности процессов обучения и обобщения ИНС. Свойство обучения состоит в том, что

после многократного предъявления сети обучающих примеров, она способна давать правильные ответы на любые входные данные из обучающего множества. Свойство обобщения позволяет ИНС после обучения и тестирования давать правильные ответы и на любые другие входные данные, не являющиеся данными обучающего множества. В этом случае основным отличием нейросетевых методов построения интеллектуальных моделей является то, что вместо математически определенной модели получается некоторый «черный ящик», содержащий реализацию искомой функции. При этом основным этапом решения задачи обработки ИИ с помощью ИНС является ее обучение.

Для неоднородных элементов РТО (например, РНС, РМД, радиосредства КДП разных диапазонов волн и пр.) отличающихся импульсным, нестационарным характером потока измерительной информации с пуассоновским законом распределения или законом распределения Вейбулла («рванный» сигнал, получаемый с большим разбросом), поступающего от ОК (при степени неоднородности от 0,7 до 1), наиболее применим метод вейвлет-преобразований.

Одной из важнейших областей применения методов вейвлет-анализа является выявление особенностей сигнала, что необходимо для оценки ТС исследуемого ОК. В данной работе ВП рассматриваются с позиций использования их как инструмента, с помощью которого можно получить признаковое пространство для последующей разработки алгоритмов классификации импульсных (аварийных) сигналов. В целом, аналитическое моделирование процесса распознавания и классификации подтверждается универсальностью математического аппарата вейвлет-анализа и способностью его адаптироваться к форме сигнала, сходностью исследуемых сигналов с базисными функциями (вейвлетами), и, в общем виде, позволяет получить аналитическую модель распознавания аварийных (предаварийных) состояний средств связи и РТО, что отражает новизну исследований в данной предметной области.

Задача повышения производительности системы контроля путем перехода к процедуре экспресс-контроля [1, 23] с выбором наиболее подходящего метода при оценивании технического состояния СрС и РТО не в полной мере обеспечивает систему управления полетами актуальной измерительной информации. Актуальность оценки информации, обновляемой в БЗ должна определяться в соответствии со статусом самой ИИ, в зависимости от ее достоверности, полноты, непротиворечивости и т. д. Количество статусов ИИ определяется вариантами реакции системы интеллектуального контроля, в соответствии со следующим набором: подтвержденный статус, нормальный статус, ориентирующий статус, экстраполированный статус и недостоверный статус.

Статус «*подтвержденный*» указывает, что результат измерений подтвержден дополнительной информацией об исправности средств связи и РТО или всей зоны контроля. При этом риск получения недостоверного результата измерений пренебрежимо мал. Данный статус предпочтителен для принятия ответственных решений по управлению оборудованием. Как правило он присваивается результату измерений, полученному от интеллектуального датчика или системы интеллектуальной контроля при поступлении от них измерительной информации об исправности средства связи (РТО).

Статус «нормальный» указывает, на то, что риск использования недостоверного результата измерений невелик, что позволяет, например, принять решение по управлению оборудованием в обычных ситуациях.

Статус «ориентирующий» указывает, что риск использования недостоверного результата измерений повышен из-за появления дефекта, отказа в СрС и РТО. При этом результат измерений может быть применен для ориентировочной оценки ТС оборудования и хода контролируемого технологического процесса. Данный статус достаточен для принятия решения в случае, например, когда параметры процесса функционирования СрС и РТО далеки от предельно допустимых. Присвоение результату измерений такого статуса указывает на необходимость выполнения процедуры регулировки (обслуживания) на ОК или в измерительной системе (АИК) и установления сроков этого обслуживания. Для процедуры ЭК регулировки должны выполняться в режиме реального времени (или близкого к нему) с целью повторной проверки функционирования наземного средства связи или РТО бортовым АИК в процессе предстоящей летной проверки и нахождении ЛПС ЭК в воздухе.

Статус «экстраполированный» показывает, что в качестве результата измерений использован результат, получаемый путем экстраполяции данных из предыдущего интервала времени, поскольку поступающая ИИ недостоверна в течение короткого интервала времени. Данный статус дает основание, например, для задержки принятия ответственного решения системой поддержки принятия решения (СППР) по управлению ОК до появления достоверной информации или принятия некоего осторожного решения, ориентируясь на гипотезу, что в течение известного интервала времени состояние оборудования и ход контролируемого процесса функционирования средства связи и РТО не претерпевает заметных изменений.

Статус «недостоверный» указывает, что риск использования недостоверного результата измерений велик. Следует принять решение об остановке оборудования, переходе на резервный комплект и выполнении обслуживания средства связи или РТО, или самой измерительной системы (АИК).

Совокупность статусов «подтвержденный» или «нормальный», а также «ориентирующий» и «недостоверный» соответствует трехзонавой системе оценки риска согласно графа состояний объекта контроля (аварийное, предаварийное, нормальное), рис. 2.

Таким образом, определение классов технического состояния СрС и РТО осуществляется на основе вероятностных переходов, с учетом постоянно обновляемой актуальной измерительной информации.

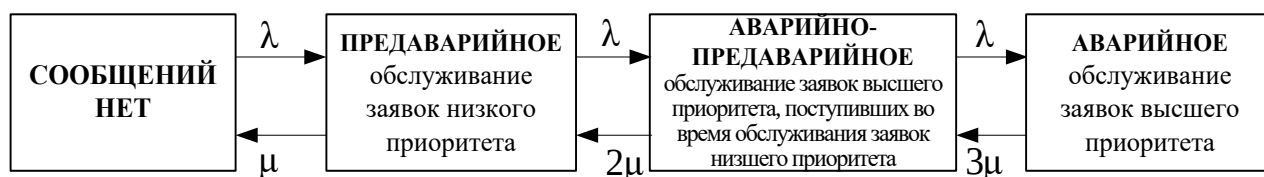


Рис. 2. Граф состояний средств связи и РТО при обслуживании заявок, поступающих в автоматизированный измерительный комплекс

Структурная схема системы интеллектуального контроля ТС СрС и РТО в отличие от известных позволяет определять класс ТС наблюдаемых ОК в различных по неоднородности зонах контроля за счет классификации поступающей в процессе контроля измерительной информации (рис. 3).

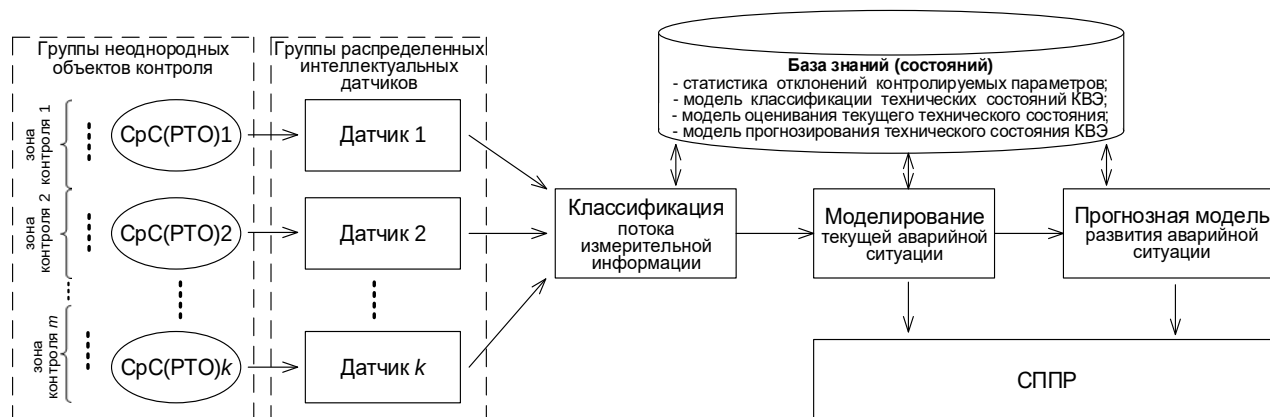


Рис. 3. Структурная схема процесса интеллектуального контроля технического состояния средств связи и РТО

Возможность параллельной обработки измерительной информации, поступающей с СрС и РТО (однородных – нейронными сетями, неоднородных – с использованием вейвлет-преобразований), обуславливает повышение производительности системы контроля, причем число потоков зависит от числа различных по неоднородности зон контроля. Особенностью системы контроля является немедленная реакция на изменение (корректировку) аварийной ситуации, что определяется on-line обновлением измерительной информации о техническом состоянии объекта контроля в базе знаний системы.

Предложенный интеллектуальный подход к оцениванию ТС СрС и РТО направлен на совершенствование автоматизированных систем контроля (АСК) технического состояния и повышает оперативность их функционирования за счет применения быстродействующих алгоритмов нейросетевой обработки измерительной информации и их вейвлет-анализа.

Достижимость технического результата в способе интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения

В предлагаемом способе интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов технический результат достигается тем, что помимо изложенных в [7-10] технических решений по ведению летных проверок РТО в качестве объекта экспресс-контроля возможно использовать любые РТС, излучающие в радио- или оптическом диапазоне волн, типа приводных аэродромных радиостанций, средств авиационной радиосвязи и светосигнального оборудования (проверка состава, расположения и цветности огней светосигнальных фонарей и маяков, прожекторных станции и другого ССО, его соответствия утвержденной для данного аэродрома схеме, а также юстировка световых пучков огней в горизонтальной и вертикальной плоскостях). При этом процедуру ЭК осуществляют поэтапно.

На предварительном этапе:

- устанавливают координаты позиций размещения стационарных и передвижных средств связи и РТО аэродрома при использовании различных направлений взлетно-посадочных полос (ВПП);
- определяют состав контролируемых наземных средств связи и РТО на основных фазах проведения полетов;
- формируют перечень их контролируемых параметров;
- назначают эксплуатационные и профилактические допуски на контролируемые параметры с учетом нормативно-технической документации (НТД) и актуальной наземной базы знания (базы состояний) по результатам инструментального контроля предыдущих мероприятий технического обслуживания и летных проверок;
- задают значения ошибок первого и второго рода при определении вида технического состояния средств связи и РТО;
- комплектуют состав модулей бортового автоматизированного измерительного комплекса летно-подъемного средства, привлекаемого к проведению процедуры экспресс-контроля;
- оценивают обстановку в районе дислокации аэродрома по времени суток, года, климатическим факторам, интенсивности полетов и пр.;
- на основании оценки обстановки и комплектации бортового АИК для проведения экспресс-контроля выбирают в качестве летно-подъемного средства БПЛА самолетного типа, квадрокоптер или иные воздушные суда аэродрома базирования, оборудованные бортовым автоматизированным измерительным комплексом экспресс-контроля;
- актуализируют базу знаний (базу состояний) бортового АИК экспресс-контроля на ЛПС с базой технического состояния наземного АИК подсистемы контроля СС и РТО, обеспечивая режим on-line;
- планируют маршруты летно-подъемного средства экспресс-контроля для облета средства связи и РТО при проведении процедуры телеизмерений их параметров ТС.

На первом этапе ЭК для обнаружения отказа СрС или РТО:

- осуществляют запуск летно-подъемного средства экспресс-контроля, в соответствии с маршрутом его проведения;
- дистанционно измеряют доступные для телеизмерений параметры радиоизлучающих средств связи и РТО с помощью бортовых радиоприемных устройств радионавигационных измерительных сигналов или световых сигналов светосигнального оборудования с помощью видеокамеры высокого разрешения;
- сравнивают измеренные значения параметров СрС и РТО с их номинальными значениями в соответствии с НТД и назначенными эксплуатационными и профилактическими допусками на них;
- сохраняют результаты сравнения в базе знаний бортового АИК;
- обрабатывают измерительную информацию всех контролируемых параметров средств связи и РТО для установления их вида ТС;

- в случае отличия от нормального функционирования формируют сигнал об отказе или предотказном состоянии средства связи или РТО;
- кодируют сигнал об отказе или предотказном состоянии объекта контроля;
- излучают сигнал об отказе средства связи и РТО в свободное пространство.

На втором этапе ЭК для идентификации отказа наземным АИК:

- после приема, декодирования, обработки, отображения и регистрации сигнала об отказе или предотказном состоянии ОК принимают решение на включение резервного комплекта средства связи и РТО, а также на проведение инструментального контроля и регулировок аварийного комплекта оборудования;
- формируют сигнал на ЛПС для повторного облета по процедуре первого этапа ЭК включенного резервного комплекта СрС или РТО, либо основного комплекта оборудования после проведения регулировок для осуществления процесса телеизмерений его выходных параметров;
- кодируют сигнал на повторный облет аварийного СрС или РТО;
- излучают сигнал на облет аварийного средства связи или РТО в свободное пространство;
- принимают бортовыми РПУ сигнал на проведение повторного облета средства связи или РТО;
- декодируют сигнал повтора процесса телеизмерений по циклу первого этапа;
- проводят повторный процесс экспресс-контроля аварийного средства связи или РТО.

На завершающем этапе экспресс-контроля:

- осуществляют посадку летно-подъемного средства экспресс-контроля на аэродром базирования (позицию БПЛА);
- актуализируют базу знаний (базу состояний) наземного АИК автоматизированной системы контроля СС и РТО измерительной информацией из базы знаний бортового АИК;
- корректируют исходные данные для предварительного этапа способа и для имитационных моделей автоматизированной системы контроля элементов распределенной системы связи и РТО;
- формируют различные виды отчетов по результатам экспресс-контроля для системы поддержки принятия решений группы руководства управлением полетами.

Благодаря перечисленной новой совокупности существенных признаков способа экспресс-контроля наземных средств связи и РТО полетов и введенной последовательности действий обеспечивается повышение оперативности процедуры контроля и доведение его до режима реального времени или близкого к нему, в том числе в процессе проведения регулировок и перехода на резервные комплекты средств связи и РТО и обратно, а также расширение перечня контролируемых средств связи и радиотехнического обеспечения аэродрома.

Реализация способа интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма способа интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов, поясняемая следующим образом.

Предварительным этапом способа является подготовка исходных данных для ведения процесса телеизмерений, при котором осуществляется следующая последовательность действий по нижеуказанным шагам 1-10.

1. Устанавливают координаты позиций размещения стационарных и передвижных средств связи и РТО аэродрома при использовании различных направлений ВПП (зона экспресс-контроля). Вариант размещения наземного стационарного и передвижного оборудования системы связи и РТО аэродрома, подвергаемого процедуре экспресс-контроля, приведен на рис. 1. При этом позиции размещения отдельных средств связи и РТО на аэродромах (вертодромах и вертолетных площадках) государственной авиации оборудуются в зависимости от задач, базирующихся на аэродроме воздушных судов, от требуемого минимума аэродрома для их посадки (взлета), характеристик бортового оборудования и местных особенностей, в соответствии с Нормами годности к эксплуатации аэродромов государственной авиации. Причем в зонах формирования диаграмм направленности излучения средств связи и РТО должны соответствовать требованиям их нормативно-технической документации. Координаты позиций развертывания средств связи и РТО выбираются специалистами связи и РТО совместно с представителями штурманской и инженерно-аэродромной службы. В зависимости от условий аэродрома допускается совместное размещение нескольких средств РТО на одной позиции при выполнении требований по типовому размещению средств и обеспечению их электромагнитной совместимости. В отдельных случаях, когда по условиям местности типовое размещение средств РТО невозможно, допускаются отступления от типового размещения с таким расчетом, чтобы обеспечить устойчивую работу средств РТО в секторах с наибольшей интенсивностью полетов (в том числе в направлениях посадочных курсов). Отступления от типового размещения средств связи и РТО полетов на категорированных и на некатегорированных аэродромах должны компенсироваться введением мер, обеспечивающих эквивалентный уровень безопасности полетов.

2. Определяют состав контролируемых наземных СрС и РТО на основных фазах проведения полетов: обеспечение взлета, полета по маршруту, обеспечение вывода ВС в заданную точку маршрута и возврата на аэродром, построения предпосадочного маневра и посадки воздушных судов, и пр. в различных метеорологических условиях, времени суток, помехах и других воздействиях (объем экспресс-контроля). Состав контролируемых заявленным способом средств связи и РТО приведен во введении и может варьироваться в зависимости от категории аэродрома. Вариант комплектации системы связи и РТО аэродрома авиационного формирования её элементами приведен на рис. 1.

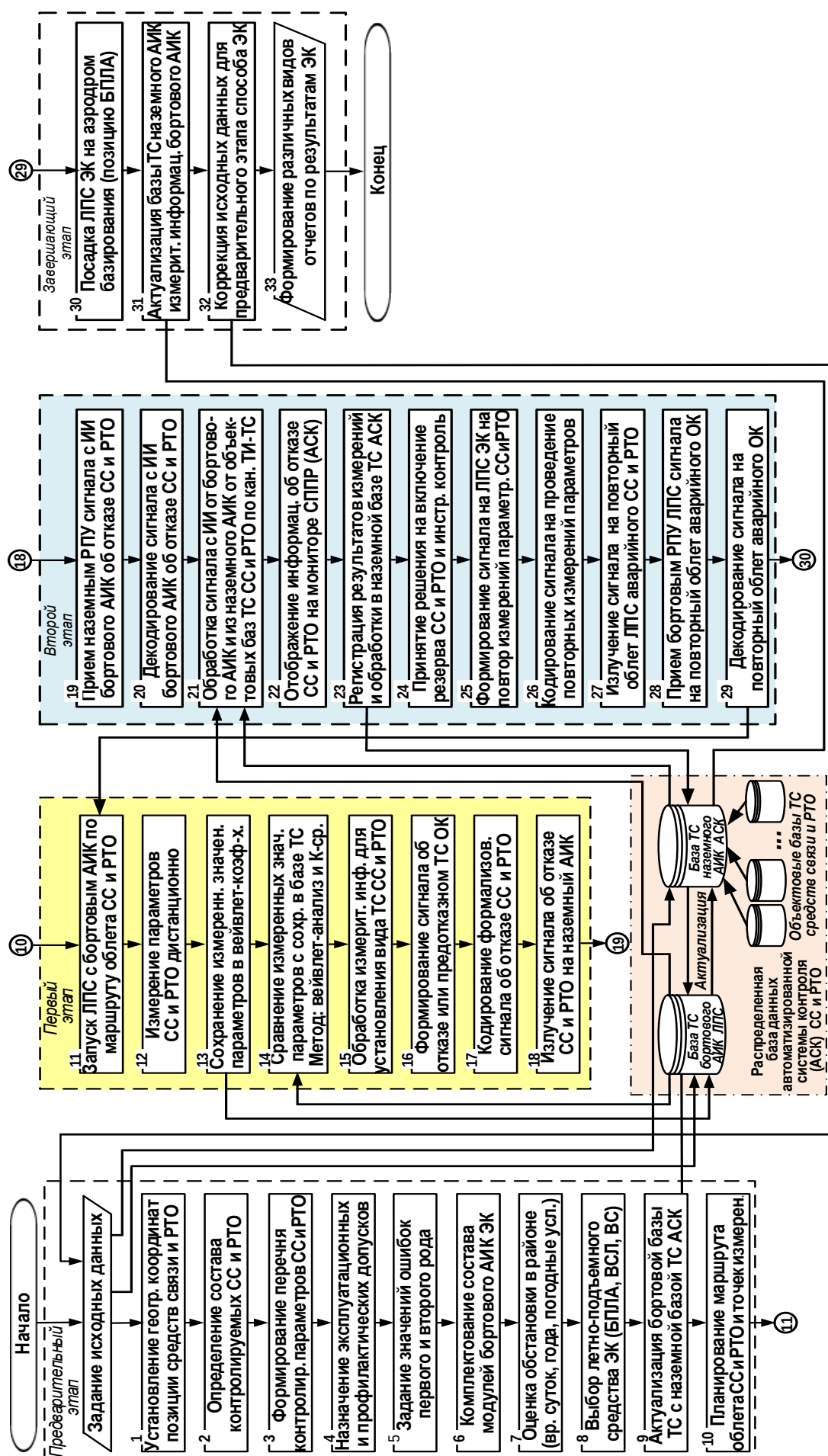


Рис. 4. Блок-схема алгоритма способа интеллектуального экспресс-контроля

3. Формируют перечень контролируемых параметров каждого наземного СрС и РТО, подвергаемого проверке для различных режимов их функционирования, определяемых ТТХ (глубина экспресс-контроля). Выбор перечня параметров, включаемых в процедуру экспресс-контроля для каждого СрС и РТО индивидуален. В качестве одного из подходов к определению перечня параметров ЭК предложено использовать коэффициент, характеризующий тяжесть последствий и критичность отказа СрС или РТО при возникновении аварии (авиационных происшествия или авиационного инцидента) по причине выхода параметров за пределы установленных допусков, а также «вклад» каждого параметра в повышение показателя надежности ОК. В статье такой коэффициент назовем *коэффициентом значимости* – $K_{\text{зн}}$. Для определения значимости включения в процедуру ЭК того или иного параметра СрС или РТО из всего множества, представленного в НТД, может служить общий коэффициент значимости $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ параметра, получаемый как сумма назначенных весов показателей $K_{\text{зн}}$ по лингвистической шкале оценки [1]. Суммарный коэффициент значимости $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$, по которому происходит включение параметра в процедуру ЭК получаем путем суммирования коэффициентов значимости $K_{\text{зн}}$ по каждому показателю лингвистической шкалы оценивания, в соответствии с выражением (1):

$$K_{\text{зн}i}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{\text{зн}i}, \quad (1)$$

где: n – общее число параметров, входящих в НТД объекта контроля. Ранжирование параметров, включаемых в процедуру ЭК, осуществляют на разных уровнях структурирования СрС и РТО (комплекс, стойка, агрегат, узел, элемент) на основе анализа морфологических блоков и структурных взаимосвязей. Чем больше весовой коэффициент элемента, тем он важнее для обеспечения надежного функционирования СрС и РТО и безопасности полетов. Окончательный перечень контролируемых в процессе ЭК параметров определяют путем построения вариационного ряда из значений суммарных коэффициентов значимости каждого из предпочтительных для включения в процедуру i -го параметра $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ из перечня НТД ОК в соответствии с выражением (2).

$$K_{\text{зн}l}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}r}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}k}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}i}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}m}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}n}^{\Sigma} \dots, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, k, \dots, l, \dots, m, \dots, r, \dots, n-1, n$ – параметры НТД. При этом в перечень параметров, включенных в процедуру экспресс-контроля, попадают параметры с наибольшими значениями суммарных коэффициентов значимости $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ в вариационном ряде (2). Число контролируемых параметров зависит от глубины проведения экспресс-контроля, отводимого на него времени, а также доступных технологий ЭК.

4. Назначают эксплуатационные и профилактические допуски на контролируемые параметры СрС и РТО на основе их НТД и актуальной наземной базы знаний СрС и РТО по измерительной информации инструментального контроля в ходе проведения предыдущих мероприятий технического обслуживания и летных проверок (точность экспресс-контроля). Процедура расчета про-

филактических допусков на средства радиосвязи с учетом их технического состояния и среды распространения радиосигнала (выбранной рабочей частоты) приведены в [5, 15, 16] и поясняются в [1].

5. Задают значения ошибок первого и второго рода при определении вида технического состояния СрС и РТО (достоверность экспресс-контроля). Решение задач минимизации ошибок первого и второго рода приведено в [16].

6. Комплектуют состав сменных модулей бортового АИК ЛПС, привлекаемого к проведению процедуры экспресс-контроля (полезная нагрузка).

7. Оценивают обстановку в районе дислокации аэродрома на момент проведения экспресс-контроля: интенсивность полетов, время суток и года, климатические факторы (осадки, облачность, ветер и пр.), помехи и воздействия (естественного и искусственного характера), а для палубной авиации – балльность волнения моря и пр. (условия проведения экспресс-контроля).

8. Выбирают вид ЛПС для проведения ЭК в зависимости от условий его осуществления, объема, глубины и полезной нагрузки: БПЛА самолетного типа, БПЛА-квадрокоптер, иные воздушные суда аэродрома, включая ВСЛ (вид летно-подъемного средства).

9. Актуализируют базу знаний (базу состояний) бортового АИК ЛПС, привлекаемого для проведения экспресс-контроля с базой знаний технического состояния наземного АИК подсистемы контроля СрС и РТО с учетом условий его осуществления, объема, глубины, точности и достоверности (обеспечение режима реального времени или близкого к нему).

10. Планируют (корректируют заранее спланированные) маршруты облета и точки наблюдения (измерения) параметров технического состояния, выбранных для экспресс-контроля СрС и РТО аэродрома (полетное задание). При этом используются известные методы построения маршрутов облета и выбора точек измерения параметров РТС, например, как описано в работах [24, 25].

Первым этапом экспресс-контроля является проведение процесса телеизмерений бортовым АИК и в случае обнаружения отказа или предотказного состояния средства связи и РТО – трансляция сигнала аварии в наземный АИК по нижеуказанным шагам 11-18.

11. Осуществляют запуск ЛПС экспресс-контроля с бортовым АИК и актуальной базой знаний (базой состояний) средств связи и РТО в соответствии с определенным полетным заданием.

12. Измеряют доступные для дистанционного контроля параметры радиоизлучающих средств связи и РТО с помощью бортовых РПУ радионавигационных измерительных сигналов или светосигнального оборудования с помощью видеокамеры высокого разрешения.

13. Сравнивают измеренные значения параметров средств связи и РТО с их номинальными значениями в соответствии с НТД и назначенными допусками (эксплуатационными и профилактическими) на них из актуальной базы знаний бортового АИК. Процедура сравнения измерительной информации с сохраненной в бортовой базе знаний (базе состояний) средства связи и РТО на основе использования вейвлет-анализа подробно приведена в [6, 20, 26].

14. Сохраняют измеренные значения параметров и результаты их сравнения с номиналами с учетом эксплуатационных (профилактических) допусков в базе знаний (базе состояний) бортового АИК. При этом для снижения объемов сохраняемой измерительной информации и повышения оперативности ее обработки на следующем шаге в базу знаний (базу состояний) осуществляется запись вейвлет-коэффициентов измеренных параметров [6, 20, 26].

15. Обрабатывают измерительную информацию всех измеренных параметров конкретного средства связи или РТО с учетом эксплуатационных и профилактических допусков, а также минимизации ошибок первого и второго рода (заданной достоверности экспресс-контроля) для установления вида ТС [17, 27, 28]. При этом процедура обнаружения отказа на первом этапе многоуровневого контроля описана в [16, 29], а поясняющий её вероятностный граф определения вида технического состояния средств связи и РТО с учетом ошибок первого и второго рода приведен на рис. 5. Причем АСК фактически реализует поэтапную процедуру ЭК, когда на первом этапе бортовым АИК ЛПС происходит *обнаружение* отказа средства связи или РТО, а на втором – его *распознавание* в наземном АИК с использованием объектовых систем контроля и наземных проводных каналов связи.

На рис. 5 обозначены классы технического состояния СрС и РТО:

«1» – система работоспособна, ложное обнаружение отказа не распознано;

«2» – система отказала, отказ обнаружен, но не распознан;

«3» – система работоспособна, ложное обнаружение и распознавание, ложный переход на резерв;

«4» – система отказала, отказ обнаружен и распознан, переход на резерв (регулировка параметра);

«5» – система работоспособна, признана работоспособной;

«6» – система отказала, но отказ не обнаружен [16].

16. Формируют формализованный сигнал о виде технического состояния объекта контроля. При этом в отличие от способов, описанных в [7-10], в процессе летной проверки от АИК ЛПС ЭК на наземный АИК транслируется не вся доступная контролю ИИ, а только вид ТС ОК: нормальное, предаварийное или аварийное состояния. Тем самым осуществляется значительное сокращение объемов передаваемой ИИ в АИК. Предпочтительным с точки зрения достоверности контроля является статус «подтвержденного» результата измерений о исправности СрС и РТО или всей зоны контроля (класс ТС «5» – система работоспособна, признана работоспособной). При получении результата измерения в виде класса ТС «4» (система отказала, отказ обнаружен и распознан) АСК в автоматическом режиме должна перейти на резервный полукомплект СрС (РТО). Передача всей доступной ИИ на наземный АИК осуществляется только в случае определения вида технического состояния, отличного от «подтвержденных» статусов нормального функционирования или аварии, например, предотказное состояние, характеризуемое статусами «ориентирующий», «экстраполированный», «недостоверный». На вероятностном графе рис. 5 данные состояния обозначены как «1», «2», «3», «6», характеризующие опасные состояния ОК [17] и требующие вмешательства оператора АСК или руководства

группы управления полетами для принятия решения. В некоторых случаях при распознавании аварийного состояния контролируемого средства связи (РТО) после перевода его автоматизированной системой контроля на резервный полупакет оператор АСК может запросить у бортового АИК и всю доступную ИИ для детального анализа ситуации в процессе диагностики отказавшего полупакета ОК, поскольку для аудита неисправности и проведения регулировок и тестовых проверок наземного оборудования системы связи и РТО формализованного сигнала с классом его технического состояния недостаточно.

17. Кодируют формализованный сигнал об отказе (предотказном техническом состоянии) методами, принятыми в системе авиационной радиосвязи.

18. Излучают формализованный сигнал об отказе объекта контроля в свободное пространство.

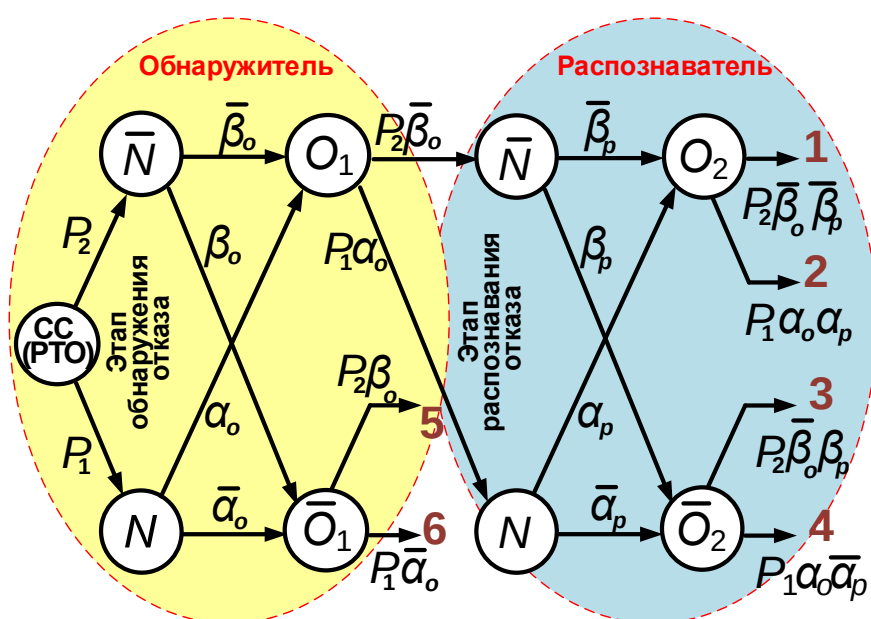


Рис. 5. Вероятностный граф определения вида технического состояния СрС и РТО

Вторым этапом экспресс-контроля является проведение процесса идентификации наземным АИК отказа, обнаруженного бортовым АИК, при котором осуществляется выполнение нижеуказанных шагов 19-29.

19. Принимают наземными РПУ формализованный сигнал бортового АИК об отказе или предотказном состоянии средства связи и РТО.

20. Декодируют сигнал об отказе (предотказном состоянии) методами, принятыми в системе авиационной радиосвязи.

21. Обработывают декодированный сигнал с бортового АИК совместно с сигналами наземного АИК средств связи и РТО аэродрома, полученными по проводным каналам телеизмерения-телесигнализации (ТИ-ТС) с аварийного наземного объекта контроля или с сохраненными в базе знаний наземного АИК по ИИ инструментального контроля в ходе проведения предыдущих мероприятий технического обслуживания и летных проверок. При этом процедура идентификации отказа на втором этапе многоуровневого контроля описана в [16].

The diagram illustrates the control system for the SS and PTO, organized into three main stages:

- ПЕРВЫЙ ЭТАП (I) (обнаружение отказа)**: Initial detection of failure. It involves the **Распределенная база данных АСК СС и РТО** (Distributed database of the ASK SS and PTO) and the **Объектовые базы ТС средств связи и РТО** (Object databases of the communication means and PTO). The system identifies the **Бортовой АИК** (On-board AIK) and the **Наземный АИК** (Ground AIK).
- ВТОРОЙ ЭТАП (II) (распознавание отказа)**: Failure recognition. This stage involves the **База ТС бортового АИК ЛПС** (Database of the PTO AIK LPS) and the **База ТС наземного АИК АСК** (Database of the ground AIK ASK). The system identifies the **Наземный АИК** and the **Бортовой АИК**.
- ТРЕТИЙ ЭТАП (III) (прогноз, восстановление) (переход на резерв)**: Prediction, restoration, and transition to reserve. This stage involves the **Распределенная автоматизированная система контроля (АСК) СС и РТО** (Distributed automated control system (ASK) SS and PTO). The system identifies the **Авт. рез.** (Automatic reserve) and the **Руч. рез.** (Manual reserve).

The diagram shows the flow of information and control signals between these components and databases, with various labels indicating the type of signal or data being transmitted.

DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108
URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2020-01/08-Budko.pdf>

Надёжностная схема замещения вероятностного графа АСК СС и РТО с учетом четвертого этапа принятия решения на восстановление оказавшего СрС и РТО (переход на резервный полукомплект) в СППР приведена на рис. 7.

Процедура определения финальной вероятности работоспособности системы связи и РТО с учетом ошибок первого и второго рода представлена на рис. 8, а процедура определения финальной вероятности отказа системы связи и РТО, соответственно, на рис. 9.

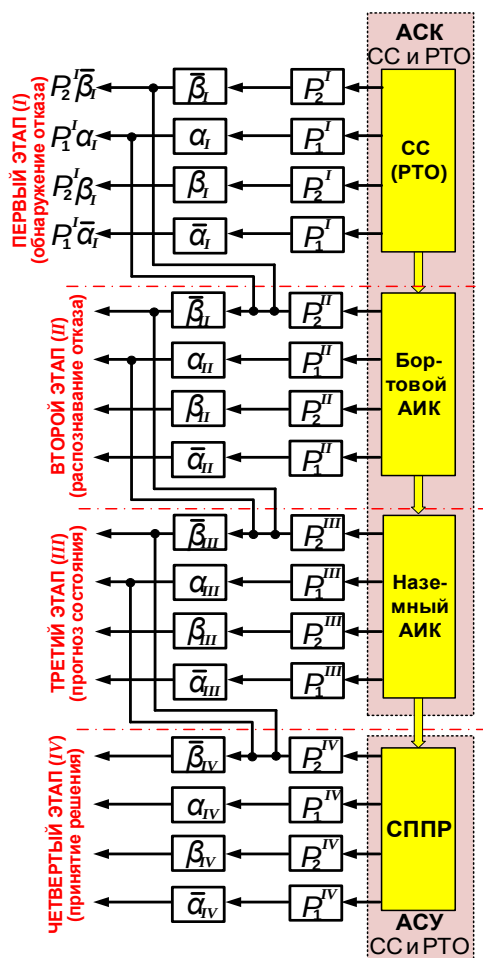


Рис. 7. Надёжностная схема замещения вероятностного графа АСК СС и РТО

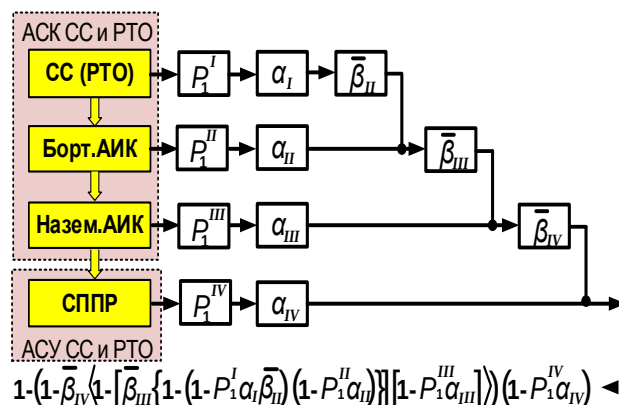


Рис. 8. Процедура определения финальной вероятности работоспособности СС и РТО

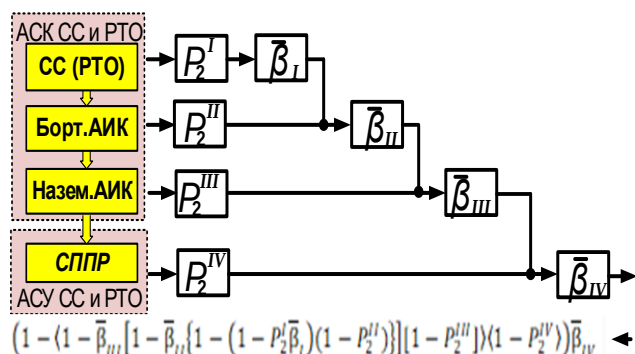


Рис. 9. Процедура определения финальной вероятности отказа СС и РТО

При этом на рис. 6-9 обозначены:

P_1 – априорная вероятность факта нормального функционирования ОК (N), $P_1 = 1 - P_2$;

P_2 – априорная вероятность факта ненормального функционирования ОК ($\bar{N}$);

N – нормальное техническое состояние средства связи (РТО), допуски параметров в норме;

O – обнаружение отказа (выход параметра СрС и РТО за пределы нормы);

A – аварийное (предаварийное) техническое состояние СрС и РТО;

α – ошибка первого рода «ложная тревога» ($\alpha = 1 - \bar{\alpha}$);

β – ошибка второго рода «необнаруженный отказ» ($\beta = 1 - \bar{\beta}$);

Авт.рез. – автоматический переход на резервный комплект средства связи и РТО;

Руч.рез. – ручное включение резерва оператором АСК после опроса АИК на объекте контроля;

I, II, III, IV – этапы процедуры экспресс-контроля;

«*» – вид технического состояния системы связи и РТО на каждом этапе экспресс-контроля.

На этапе обнаружения отказа осуществляется контроль комплексного показателя СрС и РТО $\Lambda(a)$ по заданному в исходных данных пороговому значению параметра a_0 . При выполнении заданного условия (например, $\Lambda(a) > a_0$) формируется сигнал о нормальном функционировании объекта контроля.

Пороговые значения (допуски) на параметры $x_0^1, y_0^2, \dots, \gamma_0^K$ СрС и РТО, используются на различных k уровнях его функционирования ($k = 1, 2, \dots, K$), доступных для дистанционного съема ИИ (комплекс, стойка, блок и пр.).

При невыполнении заданного условия (выходе значения обобщенного (комплексного) показателя за пределы допуска) осуществляется измерение j значений показателей ТС (параметров), где $j = 1, 2, \dots, J$, на локальном уровне СС объектовым АИК непосредственно на позиции размещения СрС (РТО), которые на следующем этапе сравнивают с пороговыми значениями $\Lambda(a) > a_0$ для идентификации места отказа. По результатам сравнения определяется нормальное ТС СрС (РТО) (N) с вероятностью $P_1 = P(N)$ либо его аномальное ТС ($\bar{N}$) с вероятностью $P_2 = 1 - P_1 = P(\bar{N})$. Аналогично происходит выявление нарушения работоспособности системы связи и РТО, т. е. ее аварийного состояния – (A) на последующих $k = 1, 2, \dots, K$ уровнях контроля и управления системой. Переход на следующий уровень идентификации отказа осуществляется при выполнении условия, что на предыдущем уровне было обнаружено аварийное состояние (A) и измеренные значения параметров данного уровня вышли за пределы установленных допусков.

22. Отображают информацию о виде технического состояния аварийного средства связи и РТО и критичном параметре (параметрах) на мониторе (табло) должностных лиц группы управления полетами [10].

23. Регистрируют результаты измерений и результаты совместной обработки сигналов в базе знаний наземного АИК автоматизированной системы контроля СС и РТО в виде вейвлет-коэффициентов [20, 26].

24. Принимают решение на включение резервного комплекта средства связи и РТО и на проведение инструментального контроля аварийного комплекта оборудования (повышение излучаемой мощности, корректировку ориентации излучающей антенны, проведение других регулировок).

25. Формируют сигнал на лётно-подъемное средство экспресс-контроля с бортовым АИК для повторного облета включенного резервного комплекта средства связи и РТО, либо основного комплекта оборудования после регулировок и измерения его выходных параметров по процедуре первого этапа.

26. Кодируют сигнал на повторный облет аварийного средства связи и РТО методами, принятыми в системе авиационной радиосвязи.

27. Излучают сигнал на повторный облет летно-подъемным средством экспресс-контроля аварийного средства связи и РТО в свободное пространство.

28. Принимают бортовыми РПУ ЛПСЭК формализованный сигнал на повторный облет контролируемого средства связи или РТО.

29. Декодируют сигнал на повторный облет, далее процедуры первого этапа, начиная с шага 11.

Завершающим этапом экспресс-контроля СС и РТО является актуализация базы технического состояния наземного АИК автоматизированной системы контроля по нижеуказанным шагам 30-33.

30. Осуществляют посадку летно-подъемного средства экспресс-контроля с бортовым АИК на аэродром базирования (позицию БПЛА).

31. Актуализируют базу знаний наземного АИК СрС и РТО аэродрома измерительной информацией базы знаний (базы состояний) бортового АИК с учетом проведенного экспресс-контроля в ходе летной проверки.

32. Корректируют исходные данные для программы предварительного этапа способа и для имитационных моделей автоматизированной системы контроля технического состояния элементов распределенной системы связи и РТО аэродрома [30].

33. Формируют различные виды отчетов по результатам экспресс-контроля.

Устройство, реализующее способ интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов

Структурная схема устройства, реализующего способ интеллектуального экспресс-контроля средств связи и РТО полетов представлена на рис. 10.

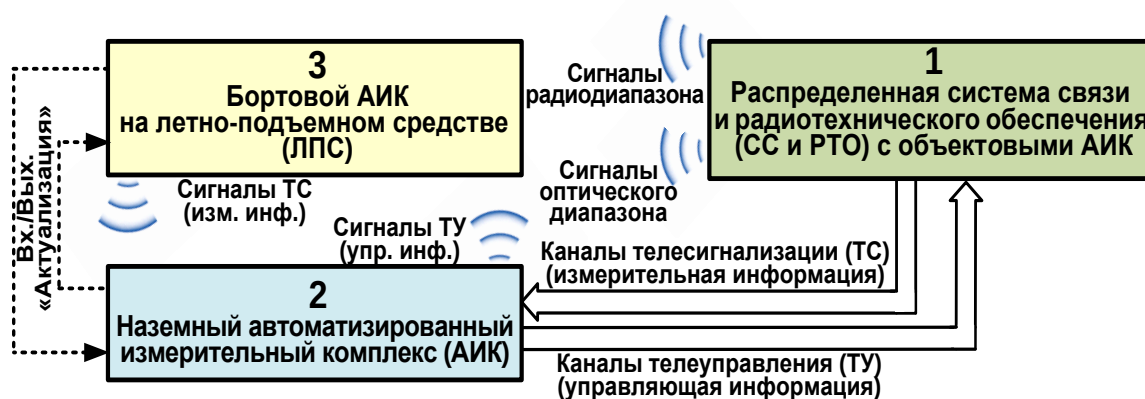


Рис. 10. Структурная схема устройства, реализующего способ интеллектуального экспресс-контроля наземных СрС и РТО полетов АФ

В предлагаемом устройстве в качестве летно-подъемных средств ЭК могут быть задействованы как специально выделенные для летных проверок воздушные суда-лаборатории (рис. 11, а), БПЛА самолетного (рис. 11, б) или квадрокоптерного (рис. 11, с) типа, так и иные воздушные суда, оборудованные типовым бортовым АИК с набором необходимых сменных измерительных модулей.

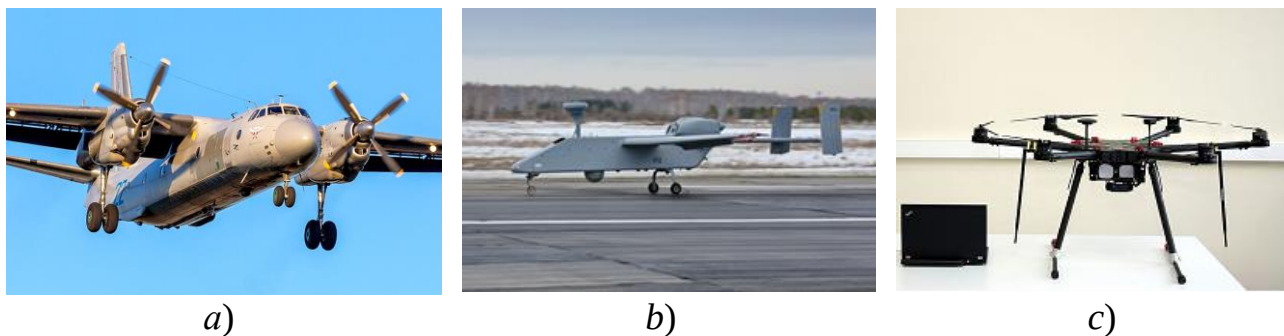


Рис. 11. Летно-подъемные средства экспресс-контроля для проведения летных проверок средств связи и радиотехнического обеспечения полетов:
а) воздушное судно-лаборатория; б) БПЛА самолетного типа;
с) радиоизмерительный комплекс на базе БПЛА-квадрокоптера

В общем виде устройство реализующего способ интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и РТО полетов состоит из:

- распределенной системы связи и РТО с объектовыми АИК – 1, см. рис. 10, предназначенной для создания благоприятных условий по эффективному управлению авиацией в воздухе, самолетовождения, взлета и посадки воздушных судов в различных метеорологических условиях, повышения точности воздушной радионавигации, контроля и регулирования полетов в районах аэродромов [31];
- наземного АИК – 2, предназначенного для сбора по наземным каналам от объектовых СрС и РТО аэродрома и по каналам авиационной радиосвязи от бортовых АИК ЛПС измерительной информации, а также её обработки, регистрации и отображения в интересах СППР руководства группы управления полетами. Наземный АИК размещается на КДП аэродрома и входит в АСК СС и РТО;
- бортового АИК на летно-подъемном средстве – 3, предназначенного для проведения летных проверок технического состояния средств связи и РТО полетов путем дистанционно проводимых измерений параметров излучаемых ими сигналов радио- и оптического диапазонов волн, их обработки, обнаружения факта отказа и идентификации вида технического состояния, а также трансляции измерительной информации с летно-подъемного средства на наземный АИК в процессе облета объектов контроля.

Каждый из элементов распределенной системы связи и РТО 1 в структуре АСК соединен каналами телеуправления-телесигнализации (ТУ-ТС) с наземным АИК с излучает в свободное пространство соответствующие сигналы радио- либо оптического диапазона волн, принимаемые и анализируемые бортовым АИК на летно-подъемном средстве. Перечень средств связи и РТО известен по нормативно-технической документации, приведен в [7, 10], во введении статьи и показан на рис. 1.

Бортовой АИК летно-подъемного средства должен иметь возможность трансляции на наземный АИК сигналов «ТС» и принимать от наземного комплекса управления полетами (АИК) сигналов телеуправления («ТУ») (управля-

ющей информации) летно-подъемным средством экспресс-контроля в процессе проведения летной проверки средств связи и РТО.

Также бортовой и наземный АИК должны иметь возможность актуализации своих баз знаний перед началом и после окончания ведения летной проверки средств связи и РТО полетов с использованием наземных каналов связи (Wi-Fi) либо на отчуждаемом носителе. При этом актуализация баз знаний 3.3 бортового АИК на летно-подъемном средстве осуществляется на земле перед началом летной проверки (шаг 9 алгоритма способа, рис. 4) на предварительном этапе экспресс-контроля с использованием базы знаний 2.8 наземного АИК, обновляющегося от объектовых баз данных 1.1.3, 1.2.3, ..., 1.i.3, ..., 1.n.3 соответствующих средств связи и РТО полетов 1.1, 1.2, ..., 1.i, ..., 1.n. Актуализация же базы знаний 2.8 наземного АИК осуществляется после посадки летно-подъемного средства экспресс-контроля на аэродром базирования (позицию БПЛА) после летной проверки на завершающем этапе экспресс-контроля (шаг 31 алгоритма способа, рис. 4).

Функциональная схема устройства, реализующего способ интеллектуального экспресс-контроля наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов приведена на рис. 12.

На рис. 12 показан состав распределенной системы связи и РТО с объектовыми АИК – 1, в которую входят отдельные средства связи и радиотехнического обеспечения (1.1, 1.2, ..., 1.i, ..., 1.n), предназначенные для осуществления инструментального захода воздушных судов на посадку аэродромов, гидродромов и вертолетных площадок, постов авиационной связи надводных авианесущих кораблей с групповым и одиночным базированием воздушных судов (летательных аппаратов, включая беспилотные летательные аппараты), а также надводных неавианесущих кораблей, имеющих на борту корабельный пункт управления авиацией и других наземных пунктов управления авиацией, узлов связи и РТО. Более полно назначение средств связи и РТО полетами (1.1, 1.2, ..., 1.i, ..., 1.n) представлено в [7, 10].

Каждое из средств связи и РТО (1.1, 1.2, ..., 1.i, ..., 1.n) известно из НТД и состоит:

- из комплекса технических средств связи (радиотехнического обеспечения) – 1.1.1, 1.2.1, ..., 1.i.1, ... 1.n.1. Назначение и состав каждого комплекса технических средств (КТС) связи и РТО в зависимости от категории и назначения аэродрома, (гидродрома, вертолетной площадки) различно, но их объединяющим признаком является возможность излучения сигналов радио- или оптического диапазона волн, в зависимости от выполняемых функций по управлению воздушным движением, а также возможности как местного (на объекте размещения), так и дистанционного управления с командно-диспетчерского пункта аэродрома по каналам телеуправления. Предполагается, что антенные системы соответствующих диапазонов волн входят в состав каждого из средств связи (РТО) и на рис. 12 не показаны;



- объектового АИК – 1.1.2, 1.2.2, ..., 1.i.2, ... 1.n.2, предназначенного для проведения автоматизированного контроля ТС соответствующих КТС связи (РТО). Объектовые АИК известны по НТД и входят в состав современных СрС (РТО) нового поколения в качестве подсистемы встроенного контроля, или придаются к наследуемым СрС и РТО старого парка в качестве дополнительного метрологического оборудования, например, в виде автоматизированного программно-аппаратного комплекса контроля и диагностики (АПАК КД) [32], входящего в распределенную АСК СС и РТО полетами. При этом каждый объектовый АИК сопряжен с подконтрольным комплексом технических средств связи (РТО) каналами телесигнализации для съема измерительной информации, а также с объектовой базой данных (базой состояний) для поддержания её в актуальном состоянии;
- базы данных (объектовой) – 1.1.3, 1.2.3, ..., 1.i.3, ... 1.n.3, предназначенной для хранения данных об эталонных значениях параметров КТС (РТО) в соответствии с НТД, их эксплуатационных и профилактических допусках, текущих (актуальных) значениях измеренных параметров ОК в ходе последней летной проверки (в том числе результаты инструментального контроля последнего технического обслуживания), а также выдаче по запросу данной информации в объектовый АИК либо в наземный АИК АСК аэродрома авиационного формирования.

Как следует из рис. 12, наземный АИК – 2 состоит:

- из блока приема 2.1, предназначенного для приема сигналов телесигнализации с измерительной информацией от бортового АИК летно-подъемного средства экспресс-контроля в УКВ диапазоне волн;
- блока декодирования 2.2, предназначенного для декодирования принятых радиосигналов «ТС» методами, принятыми в системе авиационной радиосвязи;
- пульта оператора 2.3, предназначенного для отображения получаемой измерительной информации от объектовых АИК элементов распределенной системы связи и РТО, а также бортового АИК на летно-подъемном средстве, управления наземным АИК и полетом ЛПС;
- вычислителя 2.4, предназначенного для определения и прогнозирования вида технического состояния объекта контроля на основе выполнения функций сравнения измерительной информации, поступающей из АИК летно-подъемного средства экспресс-контроля, баз данных (объектовых) и хранящейся в базе знаний наземного АИК;
- автоматического радиопеленгатора 2.5, предназначенного для пеленгования ЛПС ЭК в момент работы передатчиков бортовых радиостанций;
- блока считывания пеленга 2.6, предназначенного для сопряжения автоматического радиопеленгатора 2.5 с вычислителем 2.6 наземного АИК;
- блока траекторных измерений 2.7, предназначенного для измерения угловых координат нахождения летно-подъемного средства (БПЛА, ВСЛ) в процессе проведения экспресс-контроля;

- базы знаний наземного АИК 2.8, предназначенной для хранения данных об эталонных значениях параметров КТС (РТО) в соответствии с НТД, их эксплуатационных и профилактических допусках, текущих (актуальных) значениях измеренных параметров ОК в ходе последней летной проверки (в том числе результаты инструментального контроля последнего технического обслуживания), значениях величин ошибок контроля (ошибок первого и второго рода) при использовании различных каналов телесигнализации (радио-, проводные, волоконно-оптические), а также алгоритмы применения инструментов ЭК и сценарии применения ЛПС (маршруты его движения для облета элементов системы связи и РТО);
- блока дистанционного управления средствами связи и РТО 2.9, предназначенного для осуществления дистанционного управления элементами СС и РТО при их включении, управлении режимами работы, переходе на резервный полукомплект, выключении, а также передачи им запроса об актуальной измерительной информации;
- блока управления ЛПС 2.10, предназначенного для формирования сигналов управления полетом летно-подъемным средством с бортовым АИК для ведения экспресс-контроля;
- блока кодирования 2.11, предназначенного для кодирования управляющей информации для летно-подъемного средства экспресс-контроля методами, принятыми в системе авиационной радиосвязи;
- блока передачи управляющей информации 2.12, предназначенного для передачи управляющей информации на борт летно-подъемного средства экспресс-контроля в УКВ диапазоне волн.

Блоки 2.1, 2.2, 2.4, ..., 2.9 известны и описаны в [7, 10]. Пульт оператора 2.3 может быть представлен автоматизированным рабочим местом, например, как показано на рис. 13. Блок 2.9 известен для конкретного типа СрС и РТО, описан в [33] и может быть использован, например, из семейства аппаратуры «Дистанция», «Дистанция-М» и др. Блок 2.10 известен, используется с определенным типом БПЛА и входит в его состав, например, как описано в [3, 4, 8]. Блоки 2.11 и 2.12 известны и описаны в [10]. Предполагается, что антенные системы соответствующих диапазонов волн входят в состав блока приема 2.1 и блока передачи управляющей информации 2.12 и на рис. 12 не показаны.

Измерительная информация, полученная от АИК ЛПС экспресс-контроля поступает в наземный АИК 2 на вход блока приема 2.1, выход которого соединен с блоком декодирования 2.2, первый вход которого подключен к одноименному входу вычислителя, а второй – к входу пульта оператора 2.3. К входам вычислителя соответственно присоединены блок траекторных измерений 2.7 (вход 2), пульт оператора 2.3 через базу знаний 2.8 (вход 3) и напрямую (вход 4), а также автоматический радиопеленгатор 2.5 через блок считывания 2.6 (вход 5). Выход вычислителя «Сохранить» поступает на одноименный вход базы знаний 2.8, выход «БЗ» которой сопряжен с входом пульта оператора 2.3, который, в свою очередь, выходом «ТУ ЛПС» через блок управления ЛПС 2.10 и далее через блок кодирования 2.11 соединен с блоком передачи управляющей

информации 2.12 в интересах управления полетом ЛПС, а выходом «ТУ РТО» с блоком дистанционного управления СрС и РТО 2.9. Данный блок через группу выходов «ТУ» (телеуправление), а база знаний 2.8 через группу входов «ТС» (телесигнализация) соединены соответственно со входами КТС связи (РТО) 1.1.1, 1.2.1, ..., 1.i.1, ... 1.n.1 и выходами баз данных (объектовых) всех подконтрольных средств связи (РТО) 1.1.3, 1.2.3, ..., 1.i.3, ... 1.n.3.



Рис. 13. Конструктив пульта оператора

Также на рис. 12 приведен состав бортового АИК летно-подъемного средства 3, в который входят:

- блок сменных модулей радиоприемников измерительных сигналов 3.1, предназначенный для установки на ламелях сменных модулей приема радиосигналов различных диапазонов волн, излучаемых контролируемые средствами связи и РТО. Блок 3.1 имеет свой конструктив с со-

ответствующими массогабаритными показателями, которые зависят от объема экспресс-контроля (шаг 2 алгоритма способа), его глубины (шаг 3 алгоритма способа), формирующих полезную нагрузку под каждый вид ЛПС. Структурно блок 3.1 состоит: из модуля приема сигналов КРМ 3.1.1, предназначенного для приема сигналов КРМ; модуля приема сигналов ГРМ 3.1.2, предназначенного для приема сигналов ГРМ; модуля приемопередатчика радиодальномера 3.1.3, предназначенного для приема сигналов радиодальномера; модуля приема сигналов МРМ 3.1.4, предназначенного для приема сигналов МРМ; модуля приема сигналов азимутального РНМ 3.1.5, предназначенного для приема сигналов азимутального РНМ; модуля приемопередатчика сигналов дальномерного РНМ 3.1.i, предназначенного для приема сигналов РНМ; модуля приема сигналов ПАР 3.1.n, предназначенного для приема сигналов ПАР. В состав блока сменных модулей радиоприемников измерительных сигналов 3.1 могут включаться и иные модули радиоприемников измерительных сигналов другого оборудования СрС и РТО в зависимости от состава системы связи и РТО авиационного формирования, назначения аэродрома (гидродрома, вертолетной площадки) и его категории, например, средства связи авиационных наводчиков и пр. Модули радиоприемников измерительных сигналов 3.1.1, 3.1.2, ..., 3.1.i известны и описаны в [10]. Модуль приема сигналов приводной аэродромной радиостанции 3.1.n известен, состоит из антенн и плат комплексного технического контроля радиостанций различных диапазонов частот, и может быть построен на примере структуры аппаратных технического контроля семейства аппаратуры мобильного комплекса технического контроля (МКТК), производства АО «НИИ «Эталон» [34];

- блок контроля 3.2, предназначенный для выполнения функций сравнения измерительной информации в виде сигналов средств связи и РТО, полученных от модулей блока сменных модулей приемников радиодиапазона 3.1 и эталонной информации о радиосигналах, хранящейся в базе знаний бортового АИК 3.3, а также определения вида технического состояния объекта контроля по результатам этого сравнения. Блок контроля 3.2 известен и описан, например, в виде автоматизированного программно-аппаратного комплекса контроля и диагностики (АПАК КД) [32];
- база знаний бортового АИК 3.3, предназначенная для хранения данных об эталонных значениях параметров контролируемых средств связи и РТО в соответствии с НТД, их эксплуатационных и профилактических допусках, текущих (актуальных) значениях измеренных параметров ОК в ходе последней летной проверки (в том числе результаты инструментального контроля последнего технического обслуживания), значениях величин ошибок контроля (ошибок первого рода – «ложного отказа» и второго рода – «необнаруженного отказа»), а также алгоритмов применения инструментов экспресс-контроля;

- барометрический высотомер 3.4, предназначенный для вычисления высоты полета летно-подъемным средством (БПЛА) в процессе управления им оператором, относится к пилотажно-навигационному прибору, известен и описан в [10];
- передающая видеокамера высокого разрешения 3.5, предназначенная для ведения видеосъемки элементов светосигнального оборудования системы связи и РТО аэродрома и других ее элементов днем и ночью, известна, широко применяется на БПЛА и описана в [10];
- приемник сигналов спутниковой навигационной системы 3.6, предназначенный для приема сигналов спутниковой навигации в процессе управления оператором ЛПС, известен, широко применяется на БПЛА и описан в [10];
- блок кодирования 3.7, предназначенный для кодирования измерительной информации методами, принятыми в системе авиационной радиосвязи, известен и описан в [10];
- блок передачи измерительной информации 3.8, предназначенный для передачи измерительной информации от бортового АИК на ЛПС в интересах наземного АИК, известен и описан в [10];
- УКВ приемопередатчик 3.9, предназначенный для приема управляющей информации от наземного АИК в интересах как бортового АИК, так и управления полетом ЛПС, а также для излучения сигналов в диапазоне работы автоматического радиопеленгатора. УКВ приемопередатчик известен и описан в [10].

Предполагается, что антенные системы используемых диапазонов волн входят в состав модулей радиоприемных устройств, приемопередатчиков, приемного и передающего блоков и на рис. 12 не показаны.

При этом модули 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, ..., 3.1.i, ..., 3.1.n блока сменных модулей приемников радиодиапазона 3.1, соединены посредством группы входов «Изм. инф.» (измерительная информация) с блоком контроля 3.2, выход «БЗ» (база знаний) и вход «Эталон» которого поступают соответственно на одноименные вход и выход базы знаний бортового АИК 3.3, а выход «ТС» (теле-сигнализация) – на вход блока кодирования 3.7, другие входы которого подключены к барометрическому высотомеру 3.4, передающей видеокамере высокого разрешения 3.5 и приемнику сигналов спутниковой навигационной системы 3.6. В свою очередь, выход блока кодирования 3.7 соединен с блоком передачи измерительной информации 3.8, а выходы УКВ приемопередатчика с входом «ТУ» (телеуправление) блока контроля 3.2 и с входом подсистемы управления летно-подъемным средством экспресс-контроля (на рис. 12 не показана).

Необходимо также отметить, что база знаний 2.8 наземного АИК и база знаний 3.3 бортового АИК на летно-подъемном средстве снабжены входами/выходами «Актуализация», которые предназначены для поддержания в актуальном состоянии данных о техническом состоянии контролируемых средств связи и РТО посредством их синхронизации по результатам последних летных проверок и инструментального контроля в процессе технических обслуживаний объектов контроля.

Формирование территориально-распределенного поля значений параметров качества динамической радиотехнической системы

Одним из ключевых шагов на предварительном этапе алгоритма интеллектуального экспресс-контроля является шаг по назначению допусков (эксплуатационных и профилактических) на контролируемые параметры средств связи и РТО.

Известные методы расчета допусков на параметры радиоэлектронного оборудования (РЭО) базируются на учете ДФ, старения и технологического разброса параметров, однако не учитывают корреляцию параметров ее элементов. На сегодня вид технического состояния средств связи и РТО в процессе экспресс-контроля определяется нахождением контролируемых параметров в пределах установленных интервалов допусков для конкретного типа оборудования. При этом основные виды технического состояния рассматриваются как финальные вероятности нахождения объекта контроля в одном из возможных состояний [16]. Поскольку вид технического состояния ОК в соответствии с НТД характеризуется не одним, а множеством параметров, то для повышения достоверности контроля вместо интервала $[\theta_{i \min}, \theta_{i \max}]$ изменения одного параметра Θ_i представим некоторую область неопределенности в пространстве параметров, в которой с заданной вероятностью находятся значения контролируемых параметров ОК (рис. 14). Размер данной области определяют по числу выходных параметров, по которым ведется оценка вида технического состояния. Поскольку при ведении измерений всегда присутствуют внешние возмущения и погрешности средств измерений, то данная область неопределенности, называемая в теории контроля телом неопределенности, имеет размытые границы, перенося погрешность на значения параметров объекта контроля.

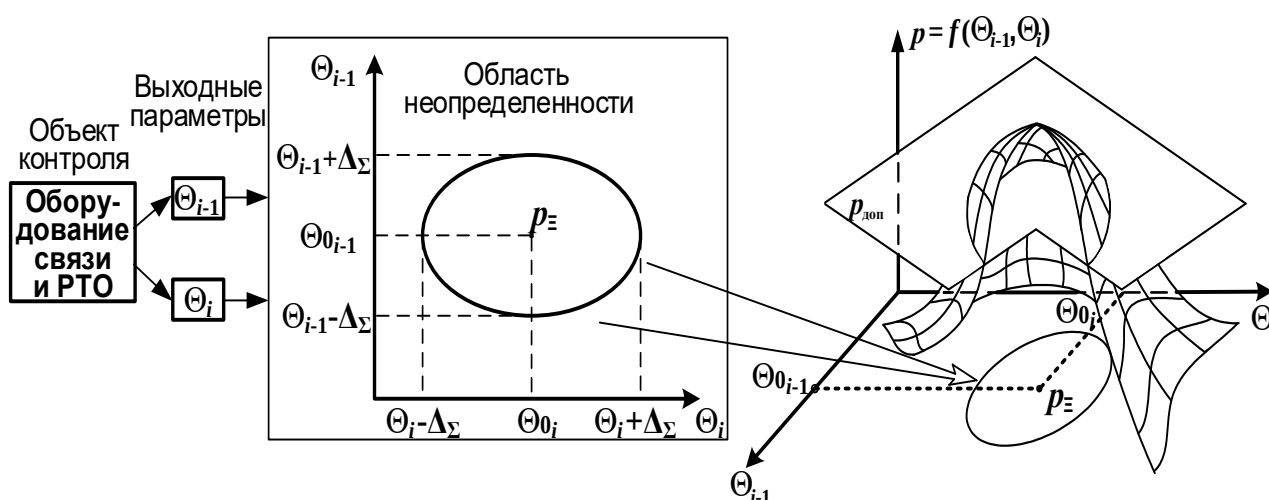


Рис. 14. Формирование области неопределенности при оценке технического состояния средств связи и РТО двумя выходными параметрами

При поиске оптимальной области неопределенности в ходе параметрического синтеза средств связи (РТО) (как динамического объекта) замена одного значения параметра ОК множеством его возможных значений обусловлена ко-

нечной точностью определения положения ОК при решении практических задач и четким определением допущений и ограничений для упрощения математической модели действующей системы [19, 21, 35]. При этом отображение заданной области неопределенности возможно как для двухпараметрического пространства с построением эллипса качества – на плоскости (рис. 14), так и для трехпараметрического с построением эллипсоида качества – в пространстве параметров (рис. 15). Данные подходы описаны в работах [3, 35] и далее развиваются в [19, 21], а для нелинейных систем в [34, 37] и др.

В реально действующих технических системах (например, СС и РТО), неопределенности редко носят случайный характер, поэтому необходимо выбирать между вероятностным и гарантированным подходами, для чего гарантированный подход должен быть «близок» к вероятностному. А поскольку вероятностный подход обычно основывается на гауссовских распределениях неопределенных величин, то более приемлем при решении задачи обработки неточных измерений в ходе экспресс-контроля технического состояния системы связи и РТО, как динамической системы является метод эллипсоидов.

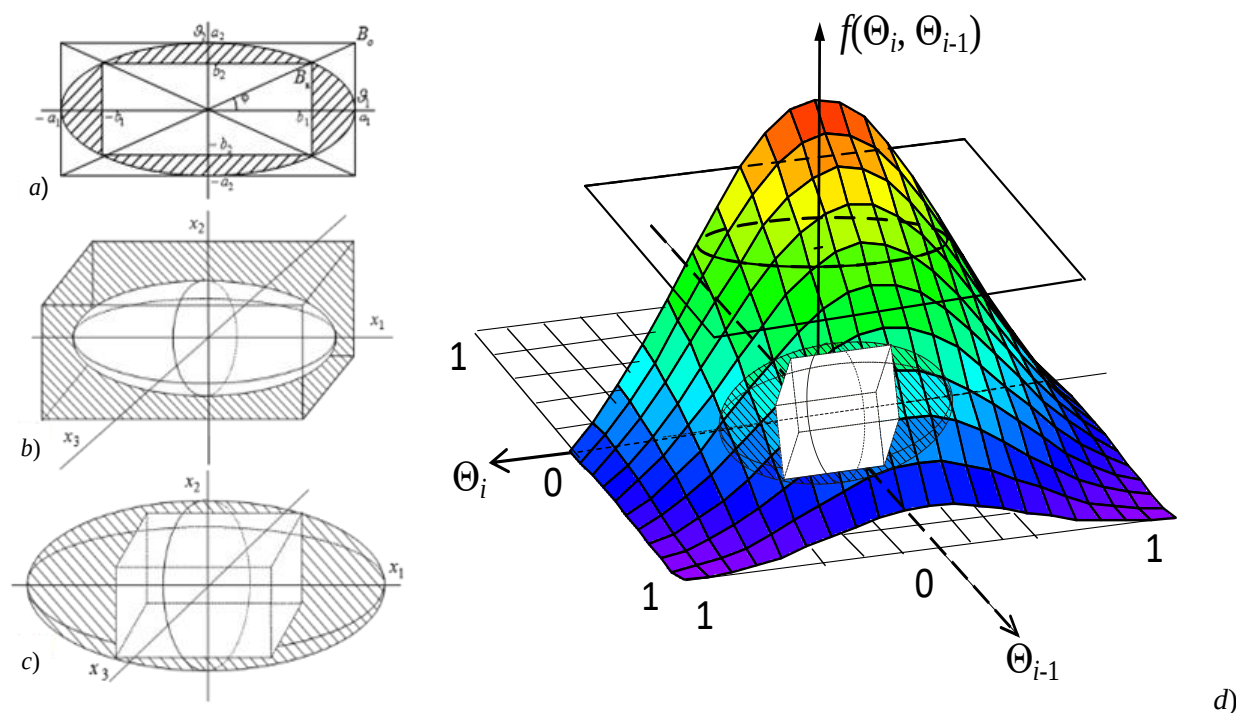


Рис. 15. Эллипс качества – a , эллипсоид качества – b , c , тело неопределенности – d для двух и трех ($m=2$, $m=3$) коррелированных параметров с учетом ошибок 1-го и 2-го рода

Рассмотрим систему связи и РТО как динамическую систему, элементы которой имеют показатели качества функционирования, зависящие от эксплуатационных параметров, меняющих свои значения от внутренних состояний (режимов работы) и от внешних воздействий ДФ (состояния среды функционирования). Зависимость показателей качества p от нестабильности эксплуатационных параметров средств связи и РТО Θ с различными характеристиками Ξ среды функционирования $p = f(\Theta, \Xi)$ предполагается непрерывной и, по край-

ней мере, дважды дифференцируемой по любому из параметров $\Theta_j \in \Theta$, $j = \overline{1, m}$. Другим предположением является то, что область работоспособности ОК ($\lg p_{\text{доп}} - \lg p_{\Xi}$) не превышает значения $0,1 \lg p_{\Xi}$ и зависимости $\{p(\Theta_j)\}$, $j = \overline{1, m}$. Тогда применив разложение Тейлора и ограничив получаемый ряд элементами с производной второго порядка, имеем:

$$p = f(\Theta, \Xi) = p_{\Xi} + \sum_j^m \frac{\partial p}{\partial \Theta_j} \Theta_j + 0,5 \sum_j^m \sum_i^m \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j \partial \Theta_i} \Theta_j \Theta_i, \quad (3)$$

где p_{Ξ} – вероятность ошибочного приема значения контролируемого параметра в связи с воздействиями среды функционирования Ξ при нахождении эксплуатационных параметров объектов контроля в номинальных значениях, т. е. при $\Theta = 0$.

Для двухпараметрического описания средства связи (РТО) ($m = 2$) зависимость $p = f(\Theta, \Xi)$ геометрически можно представить в виде трехмерной поверхности, рис. 15. При установлении допуска на показатель его качества функционирования $p_{\text{доп}}$ поверхность $p(\Theta_1, \Theta_2)$ пересекается плоскостью, параллельной плоскости параметров на уровне $p = p_{\text{доп}}$, в сечении которой имеем эллипс, описанный уравнением:

$$p_{\Xi} - p_{\text{доп}} + \sum_j^2 \frac{\partial p}{\partial \Theta_j} \Theta_j + 0,5 \sum_j^2 \sum_i^2 \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j \partial \Theta_i} \Theta_j \Theta_i = 0. \quad (4)$$

Продифференцировав выражение (4) по Θ_i , где $i = 1, 2$; $i \neq j$, и приравняв производную нулю, а также подставив найденный параметр Θ_j из выражения (4), получим уравнение эллипса относительно полуоси a_j [38]: $\gamma_{ji} a_j^2 + \gamma_{ji} a_j + \gamma_{j0} = 0$ и решим его

$$a_j^{1,2} = \frac{\left(-\gamma_{ji} \pm \sqrt{\gamma_{ji}^2 - 4\gamma_{ji}\gamma_{j0}} \right)}{2\gamma_{ji}}, \quad (5)$$

где: $\gamma_{jj} = B_j - \frac{B_j C_{jj}}{C_{ii}}$; $\gamma_{ji} = C_{jj} - \frac{C_{ji}^2}{C_{ii}}$; $4B_j = \frac{\partial p}{\partial \Theta_j}$; $B_i = \frac{\partial p}{\partial \Theta_i}$; $C_{jj} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j^2}$; $C_{ii} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_i^2}$;

$$C_{ji} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j \partial \Theta_i}.$$

Выражения (5) определяют на плоскости параметров уравнение прямоугольника B_0 , описанного вокруг эллипса, как показано на рис. 15, а). При этом значения величин $\{a_j\}$, $j = 1, 2$, рассчитанных по выражениям (5) не могут быть использованы в качестве допусков на параметры объекта контроля, т. к. существует вероятность ошибки принятия решения о работоспособности оборудования РТО, когда оно неработоспособно – «пропуск отказа». Данная вероятность, называемая ошибкой второго рода или риском потребителя, соответствует заштрихованным сегментам между эллипсом и прямоугольником B_0 и определяется выражением

$$\beta = \int_{\Theta \in \Delta a} W(\Theta | p > p_{\text{доп}}) d\Theta, \quad (6)$$

где: $W(\Theta | p > p_{\text{доп}})$ – условная плотность распределения эксплуатационных параметров Θ при значениях показателя качества ОК выше $p_{\text{доп}}$; Δa – ограниченная прямоугольником B_0 область значений параметров.

В практике эксплуатации РЭО ошибка второго рода крайне опасна, в связи с чем, для минимизации вероятности β следует допускать на эксплуатационные параметры Θ задавать путем построения вписанного в эллипс качества прямоугольника со сторонами $2b_1$ и $2b_2$, как показано на рис. 15, а). Однако при этом возникает вероятность ошибки об определении неработоспособного состояния объекта контроля при его функционировании – ошибка «ложной тревоги», называемой ошибкой первого рода, или риском заказчика. Данная ошибка пропорциональна площади заштрихованной области на рис. 15, а) и определяется выражением

$$\alpha = \int_{\Theta \in \Delta b} W(\Theta | p \leq p_{\text{доп}}) d\Theta, \quad (7)$$

где Δb – область значений параметров, ограниченная вписанным в эллипс качества прямоугольником B_b максимальной площади. Такая задача минимизации вероятности α решается в тригонометрии методом диагоналей [3], когда вершины вписанного прямоугольника B_b размещают в точках пересечения диагоналей описанного прямоугольника B_0 с эллипсом качества, приведенному к виду

$$\frac{\Theta_1^2}{a_1^2} + \frac{\Theta_2^2}{a_2^2} = 1, \quad (8)$$

$$a_2/a_1 = b_2/b_1 = \text{tg}\varphi. \quad (9)$$

Для частного случая, при $\Theta_1 = b_1$ и $\Theta_2 = b_2$ определяются стороны вписанного прямоугольника B_b , соответствующие допускам на эксплуатационные параметры ОК при ошибке $\beta = 0$ и минимальной ошибке α .

Для общего случая, при $m > 2$ (многопараметрический контроль), область работоспособности определяется границей гиперэллипсоида качества в виде [38],

$$\Theta_1/a_1 + \Theta_j/a_j + \dots + \Theta_m/a_m = 1, \quad (10)$$

с значениями полуосей a_j гиперэллипсоида качества, определяемых по (5), при

$$\gamma_{jj} = B_j - 0,5E_j^1 M_{jj}^{-1} L_j, \quad \gamma_{jj} = C_{jj} - L_j^1 M_{jj}^{-1} L_j \frac{C_{ji}^2}{C_{ii}}, \quad \gamma_{j0} = p_{\Xi} - p_{\text{доп}} - 0,25E_j^1 M_{jj}^{-1} L_j, \quad j, i = \overline{1, m},$$

где: M_{jj}^{-1} – матрица, обратная M_{jj} с элементами C_{jj} , $i \neq j$, в которой отсутствует j -й столбец и j -я строка; E_j – вектор с размерностью m и элементами B_i ; L_j – j -й столбец матрицы M_{ji} без j -й строки.

При этом значения величин допусков на параметры ОК $\{\Theta_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ равны половинам длин ребер гиперпараллелепипеда максимального объема, вписанного в гиперэллипсоид (10), т. е. $\Theta_{\text{доп}} = b_j = a_j/\sqrt{m}$, см. рис. 15 б, в, д.

Представленный выше подход позволяет осуществлять назначение эксплуатационных и расчет профилактических допусков [5] на произвольное число выбранных параметров для включения в процедуру ЭК СС и РТО. При этом сложность проведения ЭК вызвана тем, что СС и РТО это открытая, распределенная, динамичная, вероятностная и сложная эргатическая система.

Сложность системы обусловлена наличием большого числа взаимодействующих элементов – технических устройств, составляющих единое целое и обладающих существенными свойствами, отсутствующими у отдельных элементов. Каждый элемент функционирует автономно и характеризуется значительным числом эксплуатационных параметров. И действительно, только полностью развернутая и обслуживаемая система связи и РТО способна эффективно и безопасно управлять воздушным движением, в то время как отдельные элементы этой системы сами по себе такой возможности не обеспечат.

Распределенность системы связи и РТО связана с тем, что ее элементы не локализованы, а территориально рассредоточены на большой площади, географически охватывая управление всей зоной воздушного движения страны.

Система связи и РТО является *открытой*, поскольку постоянно взаимодействует с окружающей средой, на нее может воздействовать не только случайные (природно-техногенного характера), но и преднамеренные дестабилизирующие факторы.

Внешняя среда, противник и различного рода внутренние отказы вызывают постоянные изменения состояния элементов системы. В результате ее состояние непрерывно меняется, что и позволяет говорить о ней как о *динамической* системе.

Поскольку при этом все события, связанные с изменением состояния системы связи и РТО, являются случайными, то ее следует рассматривать как *вероятностную*.

На рис. 16 приведен вариант размещения СрС и РТО аэродрома базирования авиационного формирования и доступные для ведения экспресс-контроля летно-подъемные средства.

На рис. 17 представлено территориально-распределенное поле значений параметров качества динамической системы связи и РТО с учетом допускового контроля РЭС.

Отображение вида технического состояния элементов по получаемой измерительной информации от объектовых АИК элементов распределенной СС и РТО, а также бортового АИК в ходе летной проверки ЭК на АРМ оператора АСК либо на коллективном табло отображения СППР группы управления полетами КДП может осуществляться различными способами, принятыми в штатной подсистеме контроля аэродрома, в зависимости от его категории и степени автоматизации. На рис. 17 приведен лишь вариант представления физики процесса такого отображения.

Как было уже представлено выше, для осуществления процедуры ЭК в процессе функционирования СС и РТО возможно использовать ВСЛ или специально выделенные летательные аппараты (ЛА), включая БПЛА самолетного и квадрокоптерного типа (рис. 11). В зависимости от типа летно-подъемного средства, а соответственно, размещаемого на нем метрологического оборудования зависят такие характеристики как объем проводимых измерений (число контролируемых параметров), глубина контроля, время проведения, его периодичность и пр.



Рис. 16. Вариант размещения наземного оборудования системы связи и РТО аэродрома базирования авиационного формирования (АФ)

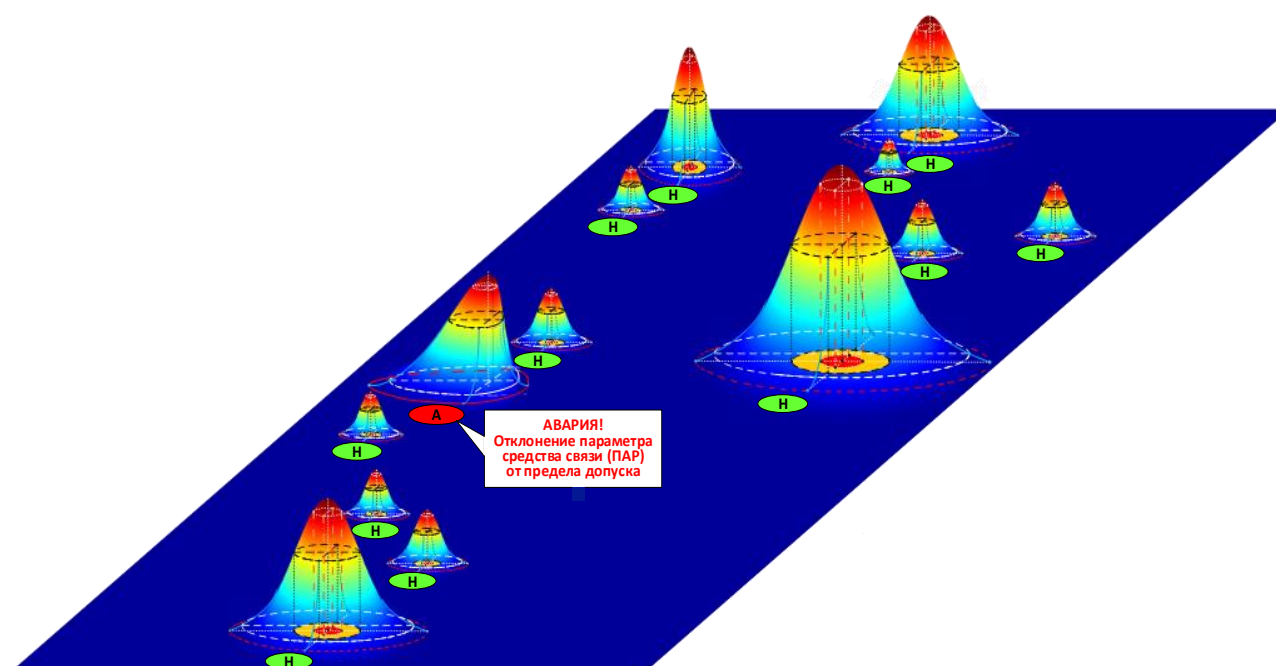


Рис. 17. Территориально-распределенное поле значений параметров качества динамической радиотехнической системы (системы связи и РТО аэродрома базирования авиационного формирования)

В случае размещения бортовых комплексов ЭК на других летательных аппаратах (ЛА) ВВС, помимо ВСЛ и БПЛА (рис. 16), оперативность ведения экспресс-контроля будет доведена до контроллинга и даже мониторинга [39] (рис. 18) за качеством функционирования системы связи и РТО аэродрома, поскольку каждый ЛА при взлете, посадке, движении в район применения авиации и нахождении над районом дислокации аэродрома, способен будет осуществлять процедуру ЭК всего территориально-распределенного поля значений параметров качества динамической радиотехнической системы, рис. 17.

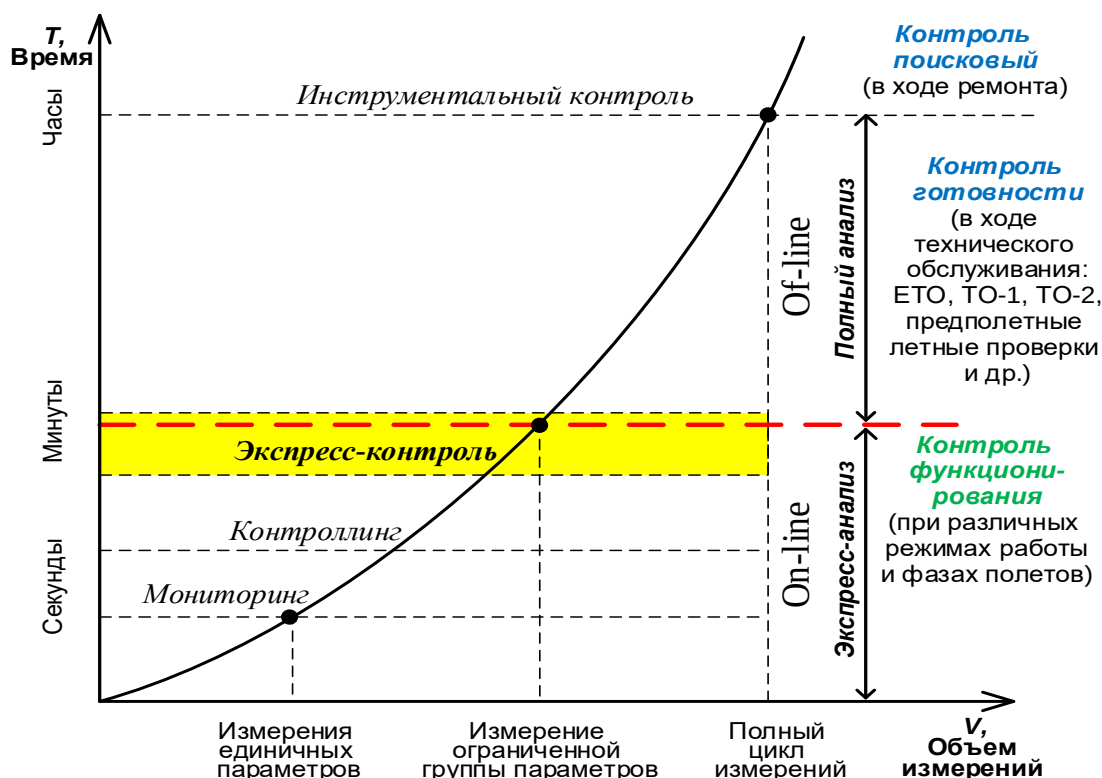


Рис. 18. Место экспресс-контроля ТС ОК в теории диагностики

При варианте размещения типовых бортовых АИК ЭК на иных ВС как авиационного формирования, так и гражданского назначения, действующих в заданной зоне воздушного движения, помимо специально выделенных ВСЛ и БПЛА, измерительная информация, получаемая бортовым комплексом (АИК) ЭК доводится до наземного комплекса (АИК) в интересах специалистов группы управления полетами исключительно только в случае выхода контролируемых параметров за пределы установленных допусков, не перегружая каналы управления воздушным движением. Это особенно важно для перенасыщенных зон воздушного движения в европейской части страны, а также в районе боевого применения авиации на театрах военных действий. Так, только в столичной зоне Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) имеется десятки аэродромов гражданского и военного назначения (включая экспериментально-испытательные) с несколькими ВПП по разным направлениям взлета/посадки, а также множество вертолетных площадок разных ведомств (включая посадочные площадки вертолетного такси) и позиции БПЛА различного класса, активно развивающиеся в настоящее время.

Заключение

В связи с вышеизложенным, предлагаемый вариант размещения типовых бортовых АИК экспресс-контроля технического состояния СрС и РТО (работающих в автоматическом режиме) на иных летательных аппаратах военного и гражданского назначения, а также доведение до КДП (диспетчерских центров ЕС ОрВД) только сигналов об аварийных средствах связи и РТО подконтрольных аэродромов, будет способствовать повышению оперативности, полноты и достоверности измерительной информации, получаемой СППР одновременно от нескольких источников (бортовых АИК ЭК ЛА) в режиме реального времени, не перегружая каналы воздушной радиосвязи измерительной информацией о нормально функционирующем оборудовании системы связи и РТО аэродромов. На рис. 16 приведен вариант взаимодействия автоматизированной системы контроля с соседним аэродромом (аэропортом) в части обмена измерительной информацией о техническом состоянии элементов системы связи и РТО.

Для поддержания системы связи и РТО в высокой готовности к применению по назначению требуется поиск новых методов автоматизированного (автоматического) дистанционного (неразрушающего) интеллектуального экспресс-контроля и технологий обработки его результатов (ИИ), способных повысить эффективность контроля функционирования по излучаемым параметрам средств связи и РТО. Учитывая низкую степень автоматизации подсистемы контроля ЕС ОрВД на современном этапе необходимо проведение НИОКР по созданию программно-аппаратных комплексов дистанционного контроля, а также методик и алгоритмов оперативной обработки больших объемов измерительной информации, получаемых от множества бортовых АИК в интересах территориально-распределенного поля значений параметров качества динамической системы связи и РТО (ЕС ОрВД).

Предложенные способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и РТО полетов могут быть применены:

- при разработке и летных испытаниях новых образцов систем посадки и радионавигационных систем для пилотируемой и беспилотной гражданской авиации, а также АФ военной авиации наземного и морского базирования (при этом под АФ понимается составная часть организационной структуры военно-воздушных сил (ВВС), включающая совокупность пилотируемых и беспилотных авиационных комплексов однородного или смешанного состава, систем материально-технического и иных видов обеспечения и управления);
- вводе средств связи и РТО в эксплуатацию;
- периодических плановых поверках СрС и РТО (летных проверках) и в ходе их технического обслуживания (инструментальном контроле);
- не плановых поверках СрС и РТО, связанных с замечаниями или жалобами военных пилотов или пилотов рейсовых гражданских самолетов, а также при воздействиях на систему связи и РТО искусственного и естественного характера (дестабилизирующих факторов);

- выполнении научно-исследовательских работ в области совершенствования элементов системы связи и РТО и повышения ее эффективности функционирования;
- повышении квалификации специалистов гражданской и военной авиации и др.

Новизной предложенного способа и устройства интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов является:

- применение процедуры экспресс-контроля (понятийный аппарат которого обоснован в [1]), осуществляемой с применением не только штатного воздушного судна-лаборатории, используемого в настоящее время с периодичностью два раза в год в авиационном формировании, но и других доступных летно-подъемных средств на базе беспилотных летательных аппаратов самолетного или квадрокоптерного типа, а также обычных гражданских и военных воздушных судов, оснащенных бортовыми автоматизированными измерительными комплексами, укомплектованными сменными измерительными модулями под решаемые задачи дистанционного экспресс-контроля наземного оборудования системы связи и РТО аэродрома;
- использование распределенной базы знаний технического состояния системы связи и РТО, формируемой в наземном АИК посредством актуализации измерительной информации, получаемой от объектовых АИК наземных средств связи и РТО и от бортового АИК летно-подъемного средства экспресс-контроля о состоянии наземных СрС и РТО, находящихся в различных стадиях развития аварийной ситуации;
- учет топологической и пространственно-временной неоднородности объекта контроля посредством использования базы знаний наземного АИК, основанной на когнитивных, «знаниевых» методах, аккумулирующей в себе опыт эксплуатации объектов и контроля аварийной ситуации за определенный промежуток времени, а также использовании адаптивных подходов (методов) контроля в определенных состояниях средств связи и РТО;
- автоматическое оценивание автоматизированным измерительным комплексом текущего технического состояния наземных средств связи и РТО с осуществлением интеллектуального выбора соответствующего математического аппарата для обработки поступающей измерительной информации: искусственных нейронных сетей или вейвлет-анализа;
- применение комплекса методов многоуровневого интеллектуального контроля технического состояния средств связи и РТО с использованием в режиме реального времени измерительной информации как от объектовых встроенных систем контроля, так и измеряемых излучений радио- и оптического диапазона волн в дальней и ближней зонах.

Литература

1. Винограденко А. М., Меженев А. В., Будко Н. П. К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 30-44. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10293.
2. Харченко А. В., Якимов В. Л. Метод обработки телеметрической информации в фазовом пространстве бортовых динамических систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2019. № 666. С. 91-101.
3. Абрамов О. В., Здор В. В., Супоня А. А. Допуски и номиналы систем управления. – М.: Наука, 1976. – 160 с.
4. Abramov O. V, Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability // Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability. 2016. С. 91-94.
5. Абрамов О. В. Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3 (53). С. 55-66.
6. Abramov O. V. Parallel algorithms for computing and optimizing reliability with respect to gradual failures // Automation and Remote Control. 2010. № 71 (7). С. 1394-1402.
7. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации (Минтранс России) от 18 января 2005 г. № 1. г. Москва. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Летные проверки наземных средств радиотехнического обеспечения полетов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования аэродромов гражданской авиации» // Российская газета. – № 3733. – 2005. – 31 марта.
8. Раев А. А., Вороник В. И., Кононенко А. В., Кузнецов М. М., Раев А. А. Использование беспилотных летательных аппаратов при оценке характеристик ЗРС // Вестник воздушно-космической обороны. 2017. № 2 (14). С. 45-48.
9. Леонов А. И., Леонов С. А., Нагулинка Ф. В., Омельчук В. П., Степанов С. П. Испытания РЛС: Оценка характеристик. – М.: Радио и связь, 1990. – 207 с.
10. Войтович Н. И., Жданов Б. В. Способ летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов и устройства для его применения // Патент на изобретение RU 2501031 С2, опубл. 10.12.2013, бюл. № 34.
11. Методические указания по летной проверке наземных радиомаяков инструментальной системы посадки аппаратурой летного контроля АЛК-70. – М.: ГосНИИ ГА, 1976. – 9 с.
12. ГОСТ 26904-86. Радиомаяки радиотехнической системы ближней навигации. Методы летных испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 11 с.

13. Ключев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В., Запускалов В. Г., Изотов А. В., Кантер Б.М., Курозаев В. П., Ланге Ю. В., Маслов А. И., Мужичкий В. Ф., Матвеев В. И., Федосенко Ю. К., Шевалдыкин В. Г. Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В.Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

14. Бондарь Д. С., Прохоров А. В. Анализ показателей надежности аэродромных систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 19. № 5. С. 118-122.

15. Федоренко В. В., Будко П. А. Расчет эксплуатационных допусков на параметры каналообразующей аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 3-4. С. 55-60.

16. Будко П. А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2012. – 512 с.

17. Abramov O. V., Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems // Automation and Remote Control. 2016. № 77 (4). С. 594-603.

18. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks // 2018 III International scientific Conference, (Convergent'2018). – Moscow, Russia, 29 November – 2 December, 2018. Communications in computing and information Science, vol.1140. Springer, Cham. – С. 200-210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5_18.

19. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Samoylenko V. V., Pedan A. V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling // The 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019). Moscow, Russia, 23-27 September 2019, vol. 1141. Springer, Cham. С. 560-573. DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4_45.

20. Kotenko I. V., Budko P. A., Vinogradenko A. M., Saenko I. B. An Approach for Intelligent Evaluation of the State of Complex Autonomous Objects Based on the Wavelet Analysis // The 18th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET'2019). Kuching, Sarawak, Malaysia, 23-25 September 2019. С. 25-38. DOI: 10.3233/FAIA190036.

21. Винограденко А. М., Будко Н. П. Адаптивный контроль технического состояния сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 1. С. 25-36.

22. Sokolov B. V., Yusupov R. M. Conceptual foundations of quality estimation and analysis for models and multiple-model systems // Journal of computer and systems sciences international. 2004. № 46 (6). С. 831-842.

23. Kotenko I., Saenko I., Ageev S. Applying Fuzzy Computing Methods for On-line Monitoring of New Generation Network Elements // Proceedings of the Third International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for

Industry» (ITI'18). Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 874. Springer, Cham. 2018. С. 331-340.

24. Гончаренко В. И., Рожнов А. В., Теплов Г. И. Планирование и координация маршрутов полета беспилотных авиационных систем в интересах организации и оценки качества систем подвижной связи // Материалы XXI Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN-2018). Россия, Москва, 17-21 сентября 2018 г. – М.: РУДН, 2018. С. 220-229.

25. Ананьев А. В., Гончаренко В. И., Лютин В. И. Построение системы автоматического наведения беспилотных летательных аппаратов с применением комплексирования результатов наблюдения цели различными датчиками // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2019. № 666. С. 47-57.

26. Будко П. А., Жуков Г. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К. Определение аварийного состояния морского робототехнического комплекса по многоэтапной процедуре контроля на основе использования вейвлет-преобразований // Морская радиоэлектроника. 2016. № 4 (58). С. 18-23.

27. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 30 с.

28. Abramov O. V., Dimitrov B. N. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // Reliability: Theory & Application. 2017. № 12 (4). С. 39-48.

29. Будко П. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К., Тимошенко Л. И. Метод многомерного статистического контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования // Датчики и системы. 2018. № 3. С. 3-11.

30. Яшин А. И., Будко П. А., Винограденко А. М., Педан А. В. Имитационное моделирование автоматизированной системы контроля технического состояния элементов распределенных радиопередатчиков // Морская радиоэлектроника. 2018. № 1 (63). С. 32-37.

31. Ивануткин А. Г. Методика оценки эффективности радиотехнического обеспечения полетов авиации // Военная мысль. 2016. № 7. С. 33-40.

32. Кузнецов С. В., Винограденко А. М. Модель единой централизованной системы управления техническим состоянием вооружения военной и специальной техники // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 4. С. 48-54. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10096.

33. Николашин Ю. Л., Винокур М. В. Развитие системы управления в корабельных комплексах связи. Этапы развития и пути совершенствования // Техника средств связи. 2020. № 1. С. 2-14.

34. Цимбал В. А., Будко П. А., Рачков В. Е., Шлаев Д. В. Увеличение зон радиообмена с использованием пакетных данных // Известия института инженерной физики. 2006. № 2. С. 35-37.

35. Акуленко Л. Д., Шматков А. М. Оптимальное по быстродействию приведение динамического объекта на поверхность эллипсоида в многомерном пространстве // Доклады академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 29-33.

36. Филиппова Т. Ф. Дифференциальные уравнения эллипсоидальных оценок множеств достижимости нелинейной динамической управляемой системы // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2010. Т. 16. № 1. С. 223-232.

37. Filippova T. F., Berezina E. V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2008. Vol. 4818. С. 326-333.

38. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1979. – 432 с.

39. Макаренко С. И. Краткий справочник научных терминов и обозначений. – СПб.: Научные технологии, 2019. – 241 с.

References

1. Vinogradenko A. M., Mezenov A. V., Budko N. P. K voprosu obosnovaniya ponyatiynogo apparata nerazrushayushchego ekspress-kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya sistemy svyazi i radiotekhnicheskogo obespecheniya aerodroma [To the question of justification of the conceptual apparatus of non-destructive Express control of the technical condition of the equipment of communications and radio engineering airfield]. *H&ES Research*, 2019, vol. 11, no. 6, pp. 30-44 (in Russian).

2. Kharchenko A. V., Yakimov V. L. Metod obrabotki telemetricheskoy informacii v fazovom prostranstve bortovyh dinamicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov [Method for processing telemetry information in the phase space of onboard dynamic systems of spacecraft]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, no. 666, pp. 91-101 (in Russian).

3. Abramov O. V., Zdor V. V., Suponya A. A. *Dopuski i nominaly sistem upravleniya* [Tolerances and ratings of control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 160 p. (in Russian).

4. Abramov O. V., Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability. *Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*, 2016, pp. 91-94.

5. Abramov O. V. Planirovanie profilakticheskikh korrekciy parametrov tekhnicheskikh ustrojstv i sistem. [Planning of preventive corrections of parameters of technical devices and systems]. *Information science and control systems*, 2017, no. 3 (53), pp. 55-66 (in Russian).

6. Abramov O. V. Parallel algorithms for computing and optimizing reliability with respect to gradual failures. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 71 (7). pp. 1394-1402.

7. Priказ Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii (Mintrans Rossii) ot 18 yanvarya 2005 g. № 1 g. Moskva, Ob utverzhdenii Federal'nyh aviacionnyh pravil «Letnye proverki nazemnyh sredstv radiotekhnicheskogo obespecheniya poletov, aviacionnoj elektrosvyazi i sistem svetosignal'nogo oborudovaniya aerodromov grazhdanskoj aviacii» [Order of the Ministry of transport of the Russian Federation (Ministry of transport of the Russian Federation) of January 18, 2005, no. 1, Moscow,

on approval of the Federal aviation regulations "Flight inspections of ground-based radio equipment for flights, aviation telecommunications and lighting systems for civil aviation airfields"]. *Rossiiskaia hazeta* [Russian newspaper], 31 March 2005. no. 3733 (in Russian).

8. Raev A. A., Voronik V. I., Kononenko A. V., Kuznetsov M. M., Raev A. A. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri ocenke harakteristik ZRS [The use of unmanned aerial vehicles in assessing the characteristics of air defense systems]. *Aerospace defense herald*, 2017, no. 2 (14), pp. 45-48 (in Russian).

9. Leonov A. I., Leonov S. A., Nagulenko F. V., Omelchuk V. P., Stepanov S. P. *Ispytaniya RLS: Ocenka harakteristik* [Tests of the radar: Evaluate performance]. Moscow, Radio and svyaz' Publ., 1990. 207 p. (in Russian).

10. Voitovich N. I., Zhdanov B. V. *Sposob letnykh proverok nazemnykh sredstv radiotekhnicheskogo obespecheniya poletov i ustrojstva dlya ego primeneniya* [Method of flight checks of ground means of radio technical support of flights and devices for its application]. Patent Russia, no. 2501031, 10.12.2013. (in Russian).

11. Metodicheskiye ukazaniya po letnoy proverke nazemnykh radiomayakov instrumental'noy sistemy posadki apparaturoy letnogo kontrolya ALK-70 [Guidelines for flight verification of ground-based beacons of the instrument landing system by ALK-70 flight control equipment]. Moscow, State research Institute of civil aviation Publ., 1976. 49 p. (in Russian).

12. State Standard 26904-86. Radiomayaki radiotekhnicheskoy sistemy blizhney navigatsii. Metody letnykh ispytaniy [Radio beacons of the near-range navigation system. Flight test methods]. Moscow, Standartov Publ., 1997. 11 p. (in Russian).

13. Kliuev V. V., Sosnin F. R., Kovalev A. V., Zapuskalov V. G., Izotov A. V., Kanter B. M., Kurozaev V. P., Lange Iu. V., Maslov A. I., Muzhitskii V. F., Matveev V. I., Fedosenko Iu. K., Shevaldykin V. G. *Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive control and diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 656 p. (in Russian).

14. Bondar' D. S., Prohorov A. V. Analiz pokazatelej nadezhnosti aerodromnykh sistem upravleniya vozdushnym dvizheniem [Analysis of the reliability indicators of airfield air traffic control systems]. *Civil aviation high technologies*, 2016, vol. 19, no. 5, pp. 118-122 (In Russian).

15. Fedorenko V. V., Budko P. A. Raschet ekspluatatsionnykh dopuskov na parametry kanaloobrazuyushchej apparatury [The Calculation of operating tolerances on the parameters of the channel-forming equipment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Radioelektronika*, 2000, vol. 43, no. 3-4, pp. 55-60. (in Russian).

16. Budko P. A. *Upravlenie resursami informacionno-telekommunikatsionnykh sistem. Metody optimizatsii: Monografiya* [Resource Management of information and telecommunication systems. Optimization methods: Monograph]. Saint Petersburg, Military Academy of communications, 2012. 512 p. (in Russian).

17. Abramov O. V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*, 2016, no. 77 (4), pp. 594-603.

18. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless

Sensor Networks. 2018 *III International scientific Conference. (Convergent'2018)*. Moscow, Russia, 29 November – 2 December 2018, Communications in computing and information Science, vol. 1140. Springer, Cham. Pp. 200-210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5_18.

19. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M., Samoylenko V. V., Pedan A. V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling. *The 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019)*. Moscow, Russia, 23-27 September 2019, vol. 1141. Springer, Cham. Pp. 560-573. DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4_45.

20. Kotenko I. V., Budko P. A., Vinogradenko A. M., Saenko I. B. An Approach for Intelligent Evaluation of the State of Complex Autonomous Objects Based on the Wavelet Analysis. *The 18th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET'2019)*. Kuching, Sarawak, Malaysia, 23-25 September 2019. Pp. 25-38. DOI: 10.3233/FAIA190036.

21. Vinogradenko A. M., Budko N. P. Adaptivnyj kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnyh tekhnicheskikh ob'ektov na osnove intellektual'nyh tekhnologij [Adaptive control of the technical condition of complex technical objects based on intelligent technologies]. *T-Comm*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 25-36 (in Russian).

22. Sokolov B. V., Yusupov R. M. Conceptual foundations of quality estimation and analysis for models and multiple-model systems. *Journal of computer and systems sciences international*, 2004, № 46 (6), pp. 831-842.

23. Kotenko I., Saenko I., Ageev S. Applying Fuzzy Computing Methods for On-line Monitoring of New Generation Network Elements. *Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'18)*. «Advances in Intelligent Systems and Computing», vol. 874. Springer, Cham. 2018. Pp. 331-340.

24. Goncharenko V. I., Rozhnov A. V., Teplov G. I. Planning and coordination of flight routes of unmanned aviation systems in the interests of organizing and evaluating the quality of mobile communication systems. *Materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Raspredelemnnye komp'yuternye i telekommunikacionnye seti: upravlenie, vychislenie, svyaz'» (DCCN-2018)* [Proceedings of the XXI International scientific Conference "Distributed computer and telecommunications networks: management, computing, communication" (DCCN-2018)]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia, 2018, pp. 220-229 (in Russian).

25. Ananyev A. V., Goncharenko V. I., Lyutin V. I. Postroenie sistemy avtomaticheskogo navedeniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov s primeneniem kompleksirovaniya rezul'tatov nablyudeniya celi razlichnymi datchikami. [Building a system for automatic guidance of unmanned aerial vehicles with the use of complexing the results of target observation with various sensors]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, vol. 666, pp. 47-57 (in Russian).

26. Budko P. A., Zhukov G. A., Vinogradenko A. M., Goydenko V. K. Detection of an accident conditions of the marine robotic complex (system) according

to the multi-stage control procedure on the basis of wavelet transform application. *Marine Radio electronics*, 2016, no. 4 (58), pp. 18-23 (in Russian).

27. State Standard 27.002-2015. Reliability in technology. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 30 p. (in Russian).

28. Abramov O. V., Dimitrov B. N., Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. *Reliability: Theory & Application*, 2017, no. 12 (4), pp. 39-48.

29. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Goydenko V. K., Timoshenko L. I. Metod mnogomernogo statisticheskogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya radioelektronnogo oborudovaniya [Method of multidimensional statistical control of the technical state of radio-electronic equipment]. *Datchiki & Systemi*, 2018, no. 3, pp. 3-11 (in Russian).

30. Yashin A. I., Budko P. A., Vinogradenko A. M., Pedan A. V. Imitacionnoe modelirovanie avtomatizirovannoj sistemy kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elementov raspredelennykh radiocentrov [Simulation of an automated system for monitoring the technical condition of elements of distributed radio centers]. *Marine Radio electronics*, 2018, no. 1 (63), pp. 32-37 (in Russian).

31. Ivanutkin A. G. Metodika otsenki effektivnosti radiotekhnicheskogo obespecheniya poletov aviatsii [Methodology for assessing the effectiveness of radio engineering support for aviation flights]. *Military Thought*, 2016, no. 7, pp. 33-40 (in Russian).

32. Kuznetsov S. V., Vinogradenko A. M. Model' yedinoy tsentralizovannoy sistemy upravleniya tekhnicheskimi sostoyaniyem vooruzheniya voyennoy i spetsial'noy tekhniki [Model of a centralized automated system for controlling technical condition of armaments, military and special equipment]. *H&ESResearch*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 48-54. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10096 (in Russian).

33. Nikolashin Yu. L., Vinokur M. V. Razvitiye sistemy upravleniya v korabel'nykh kompleksakh svyazi. Etapy razvitiya i puti sovershenstvovaniya [Development of a control system in ship communication systems. Stages of development and ways of improvement]. *Means of communication equipment*, 2020, no. 1, pp. 2-14 (in Russian).

34. Tsimbal V. A., Budko P. A., Rachkov V. Ye., Shlayev D. V. Uvelicheniye zon radioobmena s ispol'zovaniyem paketnykh dannykh [Increase in radio exchange zones using packet data]. *Izvestiya Instituta inzhenerenoy fiziki*, 2006, no. 2, pp. 35-37 (in Russian).

35. Akulenko L. D., Shmatkov A. M. Optimal'noe po bystrodejstviyu privedenie dinamicheskogo ob"ekta na poverhnost' ellipsoida v mnogomernom prostranstve [Optimal speed reduction of a dynamic object on the surface of an ellipsoid in multidimensional space]. *Doklady Akademii Nauk*, 2017, vol. 477. no. 1, pp. 29-33 (in Russian).

36. Filippova T. F. Differentsial'nye uravneniya ellipsoidal'nykh ocenok mnozhestv dostizhimosti nelinejnoj dinamicheskoy upravlyaemoj sistemy [Differential equations of ellipsoidal estimators of reachability sets of nonlinear dynamic controlled system]. *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN*

[Proceedings of the Institute of mathematics and mechanics of Ural otd. RAS], 2010, vol. 16. no. 1, pp. 223-232 (in Russian).

37. Filippova T. F., Berezina E. V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, vol. 4818, pp. 326-333.

38. Evlanov L. G. *Kontrol' dinamicheskikh sistem* [Control of dynamic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 432 p. (in Russian).

39. Makarenko S. I. *Spravochnik nauchnykh terminov i oboznachenij* [Handbook of scientific terms and designations]. Saint Petersburg. Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2019. 254 p. (in Russian).

Статья поступила 16 марта 2020 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.

Винограденко Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: интеллектуальный контроль информационно-телекоммуникационных систем. E-mail: vinogradenko.a@inbox.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Меженев Алексей Викторович – адъюнкт. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы экспресс-контроля информационно-телекоммуникационных систем. E-mail: a.mezhenov@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Чикирев Александр Александрович – офицер службы военной полиции Восточного военного округа. Область научных интересов: автоматизированные системы обработки информации и управления. E-mail: challix@mail.ru

Адрес: 680030, Россия, г. Хабаровск, ул. Павловича, д. 30.

Method and equipment of the intelligent express control of the technical condition of ground-based means of communication and radio-technical flight support

P. A. Budko, A. M. Vinogradenko, A. V. Mezhenov, A. A. Chikirev

Relevance: development of a method and device for intelligent express control of the ground-based means of communication and radio-technical flight support. Improving the efficiency of the control procedure and bringing it the real time. **Problem statement:** the search of new methods of express diagnostics of the state of complex technical systems with a high failure price using the example of a communication system and radio-technical support of an aviation formation airfield. **The aim of the work** is to introduce the concept of the intelligent express control, as a component of the express diagnostics, as well as the development of a method and device for its implementation on a radio system. Provided that, determining the type of technical con-

dition of an object by a limited number of controlled parameters in real time or close to it refers in the article as express control. **Methods used:** the process of the express control conducting is demonstrated on the example of the diagnostics of communication system and radio-technical support of an aerodrome by the non-destructive testing methods with the option of constructing a geographically distributed field of the parameters of quality of the test object. **Novelty:** the express control procedure is carried out using not only a full-time laboratory aircraft, which is currently used twice a year in aviation unit, but also other available flight-lifting equipment based on unmanned aerial vehicles of aircraft or quadcopter type, and civil and military aircraft as well equipped with automated measuring systems, completed with changeable measuring modules for the express control of the ground equipment of the communication system and radio technical support of the airfield. **Result:** The method of intelligent express control of the ground-based communications and radio-technical flight support consists of: a preparation stage carried out on the ground, which includes the preparation of the initial data for the television measurements and the equipping of an on-board automated measuring complex for the necessary tasks; the first stage of the television measurements by the on-board automated complex during the flight test, when an emergency signal is transmitted to the ground-based automated measuring complex due the equipment failure or pre-emergency status of the means of communication and radio-technical equipment; the second stage includes the process of identifying a failure by a ground-based automated measuring complex with the use of object-based monitoring systems of communications and radio-technical support; the final stage of the method includes the updating of the knowledge base (state base) of the automated control system and the formation of various types of reports of the express control. A structural and functional diagram of a device has been developed that implements a method of intelligent express control of ground-based communications and radio-technical flight support, as well as the appearance of the design of the operator panel of an automated control system of a flight management group. **Practical relevance:** the use of unmanned aerial vehicles in the intelligent express control; the retrenchment of the economic and other resources during the flight inspections; the realization of the frequency of flights up to the monitored mode.

Key words: express diagnostics, intelligent express control, automated measuring system, flight inspection, failure identification.

Information about 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, d. 8.

Alexey Mikhailovich Vinogradenko – PhD, Docent, Doctoral Candidate. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: intellectual control of information and telecommunication systems. E-mail: vinogradenko.a@inbox.ru

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretsky pr, 3.

Alexey Viktorovich Mezhenov – Postgraduate student. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: express control methods of information and telecommunication systems. E-mail: a.mezhenov@yandex.ru

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretsky pr, 3.

Alexander Alexandrovich Chikirev – Military Police Officer. Eastern Military District. Research interests: automated information processing and management systems. E-mail: challix@mail.ru

Address: 680030, Russia, Khabarovsk, st. Pavlovich, d. 30.