

УДК 621.396

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-20-32

## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СМЕШАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ КОМПЛЕКСОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

А.В. БУНИН<sup>1</sup>, А.Н. ПОТАПОВ<sup>2</sup>, Е.Е. БУЕШЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

В процессе эксплуатации техники узлы и агрегаты подвергаются постоянному воздействию ряда факторов, по-разному влияющих на ее техническое состояние (ТС). Выбор метода управления техническим состоянием радиотехнических комплексов средств автоматизации (КСА) управления воздушным движением обусловлен рядом конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик. Влияние эксплуатационных характеристик на ТС объектов находит свое отражение в виде отклонений от номинала их параметров. Стохастический характер и многообразие воздействия эксплуатационных характеристик на КСА приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации объекты обладают различным фактическим ТС. Эксплуатационно-технические характеристики КСА обладают рядом свойств, которые могут значительно влиять на выбор метода управления ТС. Эти свойства имеют важное значение для формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции КСА. Техническая эксплуатация КСА характеризуется наличием объективного процесса изменения ТС и субъективного процесса технической эксплуатации, представляющего собой последовательную во времени смену различных состояний в соответствии со схемой переходов. Предложенный в работе модернизированный метод формирования смешанной системы управления техническим состоянием на основе декомпозиции комплексов радиотехнических средств позволяет учитывать не только ранг (вес), характеризующий относительную важность характеристик, но и влияние свойств этих характеристик при выборе методов управления ТС. Содержание модернизированного метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции КСА по характеристикам позволяет учитывать основные свойства эксплуатационно-технических характеристик путем введения дополнительных процедур.

**Ключевые слова:** комплекс средств автоматизации, метод, техническое состояние, характеристики, система управления, декомпозиция, радиотехническое средство.

### ВВЕДЕНИЕ

Выбор того или иного метода управления техническим состоянием (ТС) комплексов средств автоматизации (КСА) управления воздушным движением (УВД) обусловлен рядом конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик, а также все возрастающей потребностью снижения затрат на эксплуатацию КСА и повышением их надежности и эффективности применения. В процессе эксплуатации техники узлы и агрегаты подвергаются постоянному воздействию ряда факторов, по-разному влияющих на ее ТС. Основные факторы, влияющие на изменение ТС, можно разделить на конструктивно-технологические, определяющие начальное качество объектов, и эксплуатационные, отражающие изменение ТС в процессе эксплуатации [1, 2].

К первой группе характеристик относятся: выбор схемных и конструктивных решений, элементов и материалов; технология изготовления деталей и узлов, сборки и испытания объектов; качество производства; характеристики текущего и выходного контроля. Во вторую группу входят эксплуатационные характеристики, которые могут быть субъективными и объективными. Субъективные характеристики связаны с воздействием обслуживающего персонала и могут способствовать как повышению, так и снижению надежности. Они связаны с выбором правильных режимов эксплуатации объектов, их технического обслуживания и ремонта, квалификаци-

ей обслуживающего персонала и качеством его работы. Объективные характеристики отражают: условия работы объектов, включающие значения и периодичность повторения эксплуатационных нагрузок (статистических и динамических), испытываемых агрегатами и узлами в процессе нормальной эксплуатации.

В основном эти характеристики связаны с выбором правильных режимов эксплуатации объектов, их технического обслуживания и ремонта, квалификацией обслуживающего персонала и качеством его работы.

### **ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСОВ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ**

Для решения широкого класса военно-прикладных задач при организации мероприятий по технической эксплуатации (ТЭ) комплексов требуется достоверная и своевременная оценка их технического состояния. В процессе эксплуатации комплексов средств автоматизации (КСА) изменяется их ТС, которое может определяться как исправное, работоспособное, неисправное и неработоспособное в зависимости от значений технических параметров в определенный момент времени. Для поддержания надежности техники на этапе эксплуатации проводится техническое обслуживание (ТО).

Задачами ТО являются [6]:

- предупреждение преждевременного износа механических и электромеханических элементов, входящих в состав техники;
- предупреждение неисправностей, вызываемых процессами старения и износа элементов, деталей и узлов аппаратуры;
- предупреждение ухода электрических параметров и характеристик аппаратуры за пределы установленных норм, а также доведение параметров и характеристик до норм, установленных эксплуатационной документацией;
- выявление и устранение неисправностей и причин их возникновения;
- продление межремонтных ресурсов и сроков службы.

Однако отказы и повреждения КСА, как правило, являются случайными событиями, место и время возникновения которых определить затруднительно. Мероприятиями ТО предупредить внезапные отказы практически невозможно, и для восстановления работоспособности КСА необходимо проводить ремонт.

С этой целью в настоящее время применяются современные методы эксплуатации КСА, появляются крупные теоретические и практические разработки в области высокоэффективных стратегий ТО. Стратегия ТО является системой управления ТС изделия в заданных условиях эксплуатации. Управляющие воздействия в этой системе формируются в зависимости от значений принятого признака ТС изделия, т. е. в соответствии с принятыми стратегиями ТО, и выражаются в проведении тех или иных операций ТО.

При всех стратегиях ТО мероприятия по повышению надежности изделий, корректировка объемов и периодичности ТО осуществляются на основе анализа информации о всех признаках ТС изделий и эффективности системы ТО. Однако методы анализа и использования различных видов информации зависят от стратегий ТО. Один из видов информации является основным при принятии решений о необходимом перечне операций ТО и периодичности их выполнения. Остальные данные используются для корректировки принимаемых решений с целью повышения их эффективности.

Каждая стратегия ТО определяет техническую политику и затраты на ТО изделия и предъявляет определенные требования ко всем элементам системы ТО, т. е. к объектам, средствам, исполнителям и к связям между этими элементами, установленным в документации. Стратегия ТО

данного типа изделия выбирается на основе анализа надежности изделия, влияния его отказа на безопасность и регулярность обеспечения полетов, зависимости безотказности от наработки, эксплуатационной технологичности, прежде всего контролепригодности изделия, технической возможности и экономической целесообразности применения той или иной стратегии.

Принципиально выделяются две основные стратегии технической эксплуатации КСА:

- стратегия технической эксплуатации по ресурсу (программное управление по замкнутому циклу);
- стратегия технической эксплуатации по состоянию (управление по замкнутому циклу с обратной связью по информации о состоянии техники).

Методы, применяемые для анализа проблем технической эксплуатации, связаны с принятием решения при наличии недостаточно достоверных данных.

Предполагается, что рассматриваемые образцы КСА во время эксплуатации находятся в одном из нескольких состояний, причем два крайних состояния будут «исправное» и «неработоспособное». Между ними расположен ряд промежуточных состояний, которые отражают различную степень ухудшения характеристик. Переход от состояния к состоянию является вероятностным, закон которого может быть полностью известен, частично известен или полностью неизвестен тому, кто должен принять решение.

Если оборудование состоит из нескольких частей, то по каждой части должны быть приняты определенные меры, причем выбор мер для одной части может зависеть от состояния одной или нескольких других частей, последовательность мер, выбираемых тем, кто принимает решение, отражает систему технической эксплуатации. Качество системы можно измерить затратами, путем определения стоимости техники в каждом состоянии и стоимости выполнения каждого вида работ.

При стратегии ТО по наработке перечень и периодичность выполнения операций определяются значением наработки изделия с начала эксплуатации или после капитального (среднего) ремонта. При такой стратегии система правил управления состоянием КСА формируется заранее на основе априорной информации об эксплуатационных свойствах парка КСА.

Из информации о текущем состоянии используются только сведения об отказах, а концепция управления исходит из предположения, что любой объект может иметь только два определенных состояния: отказ или выработку назначенного ресурса.

Объем и периодичность операций строго регламентированы и не зависят от фактического состояния техники. Необходимый уровень надежности КСА достигается за счет периодического обновления элементов эксплуатируемых изделий и обновления образцов КСА, при этом увеличиваются расходы на ТЭ.

Она основывается на проведении определенного фиксированного объема работ через установленные промежутки времени (календарные или по наработке). Стратегия технической эксплуатации по наработке организуется на основе принципа безопасного срока службы, исходя из которого для изделия назначается ресурс, в течение которого с заданной вероятностью не имелось бы ни одного отказа.

По всей видимости, эта стратегия эксплуатации будет иметь право на жизнь еще долгое время, так как в КСА есть ряд изделий, которые быстрее и экономичнее заменить, чем установить степень их износа на основе сложного, дорогостоящего, а иногда и не совсем надежного контроля.

Первоначальный регламент технической эксплуатации (при стратегии по наработке) разрабатывается в процессе создания КСА специалистами предприятий промышленности, причем при его разработке учитывают две группы факторов.

Первая группа содержит обобщенные материалы по опыту эксплуатации аналогичных типов КСА (перечень работ, периодичность их выполнения, перечень и характер неисправностей по системам, интенсивность их появления).

Вторая группа отражает индивидуальные, специфические особенности конкретного изделия (особенности конструкции, предполагаемые условия эксплуатации, результаты стендовых и лабораторных испытаний и т. п.).

При определении оптимальной периодичности обслуживания могут использоваться различные критерии. В общем случае оптимальным критерием для регламента является такой, который обеспечивает максимальную надежность работы объекта в межрегламентный период при минимальном значении трудозатрат на ТО.

Эту стратегию целесообразно применять для изделий, имеющих тенденцию к существенному росту интенсивности отказов после определенной наработки, при незначительном разбросе значений наработок до отказа, преимущественно для тех изделий КСА, отказы которых влияют на безопасность полетов.

Она применяется также как вынужденная мера при невозможности применения стратегии ТО по состоянию из-за отсутствия методов и (или) средств диагностирования или экономической целесообразности. Система алгоритмов стратегии ТО по состоянию формируется при условии получения текущей информации о действительном состоянии каждого образца КСА, при этом учитываются также и априорные данные об эксплуатационных свойствах.

Реализация эксплуатации по состоянию обязательно требует непрерывного или дискретного контроля и анализа состояния КСА. Все виды работ: контроль состояния, замены, ремонт и прочие – производятся в срок и в объемах, которые устанавливаются в результате решения по данным текущего контроля состояния.

Предельное (предотказовое) состояние также устанавливается на основе знания текущей информации об объекте. В этом случае объекты эксплуатируются без ограничения межремонтного ресурса с проведением непрерывного или периодического контроля ТС каждого объекта в процессе эксплуатации. Достижение установленного в эксплуатационной документации для каждого типа объектов предотказового значения, определяющего ТС параметра (совокупности параметров), означает неисправное состояние объекта и указывает на необходимость проведения работ по его восстановлению. Периодичность контроля ТС при ТО устанавливается в эксплуатационной документации и может быть постоянной для парка однотипных изделий КСА или зависеть от результатов предыдущего контроля и прогнозирования ТС каждого объекта.

Такая стратегия наиболее подходит для объектов, обладающих достаточным уровнем контролепригодности, наработка до отказа которых имеет существенный разброс.

Стратегия ТО по состоянию в настоящее время более актуальна при внедрении в систему технической эксплуатации. Это связано прежде всего с тем, что возрастание объема контролируемых параметров из-за увеличения числа выполняемых функций, усложнение связей внутри комплексов приводят к резкому увеличению трудозатрат на ТЭ и снижению готовности КСА в целом.

Существовавшая до недавнего времени единая жесткая стратегия эксплуатации по наработке не в состоянии полностью устранить противоречия между возросшим объемом контроля и требованиями руководящих документов по обеспечению готовности КСА к применению.

Решающее значение при выборе стратегии ТО применительно к конкретному типу объекта принадлежит целенаправленным исследованиям, позволяющим проводить оптимизацию эксплуатации по тем или иным критериям.

В настоящее время в основном действует плано-предупредительная система эксплуатации, которой присущи признаки метода эксплуатации по наработке (ресурсу), характерными чертами которого являются: установление различного вида ресурсов отдельных изделий и КСА в целом; проведение профилактических мероприятий через заранее выбранные интервалы времени наработки независимо от фактического состояния систем и изделий – регламентных, периодических и др.

Однако имеется ряд негативных факторов, связанных с применением метода эксплуатации по наработке, к которым относятся следующие.

1. Низкие значения гарантийных ресурсов (сроков службы) КСА и отсутствие единого принципа их обоснования.

2. Применение нерациональных форм эксплуатации КСА (при фиксированных ресурсах, назначении объемов капитального ремонта без учета фактического состояния).

3. Анализ информации о функционировании КСА на различных стадиях жизненного цикла показывает, что наиболее длительными и затратными являются эксплуатационная и ремонтная стадии. Как показывают проведенные исследования, в среднем длительность эксплуатационной и ремонтной стадии оценивается в 60–70 % а затраты в 50–60 % от значения длительности и затрат за весь цикл от проведения НИОКР по разработке КСА до их утилизации.

4. Установленные предельные ресурсы (сроки службы) для многих видов КСА не обоснованы, что приводит к повышенным затратам за счет досрочного их списания, необоснованным проблемам для продления их сроков эксплуатации и преждевременным отправкам в заводской ремонт.

Не способствует рациональной эксплуатации планово-предупредительная система ТО и из-за длительных сроков обслуживания, связанных с избыточностью фиксированных объемов работ. Особенностью эксплуатации КСА является и то, что применение новой элементной базы, цифровой обработки информации и подобное приводит к существенному изменению характера процессов, описывающих техническое состояние КСА во времени.

Эксплуатационные характеристики изменяются в широких пределах, а их воздействие на ТС объектов носит случайный характер. Влияние эксплуатационных характеристик на ТС объектов находит свое отражение в виде отклонений от номинала их параметров вследствие износа и старения деталей, а также разрегулировки агрегатов. Следствием происходящих в элементах физико-химических процессов является изменение во времени их параметров и характеристик.

Процесс отказа обычно представляет собой некоторый временной процесс. Его внутренний механизм и скорость определяются различными параметрами:

- структурой и свойствами материала;
- напряжениями, вызванными нагрузкой;
- температурой и другими факторами.

Природа физико-химических процессов, приводящих к отказам элементов и систем, очень сложна, и до сегодняшнего дня изучена не полностью. Зачастую число параметров, с учетом которых строятся математические модели износа и старения, очень велико. Поэтому в теории надежности используются вероятностные показатели, такие как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, гамма-процентный ресурс и др. Все эти показатели можно представить в виде определенной сложной функции [3]:

- случайных переменных;
- первоочередных значений параметров и характеристик элементов; скорости изменения параметров;
- предельных или критических значений этих характеристик и параметров;
- нагрузок;
- воздействий окружающей среды;
- режимов работы.

Стохастический характер и многообразие воздействия эксплуатационных характеристик на КСА приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации объекты обладают различным фактическим ТС. Как известно из теории надежности, неисправное состояние характеризуется несоответствием любого параметра объекта требованиям, которые определяются нормативно-технической документацией. Изменение ТС объекта называют объективным процессом, который возникает под воздействием многообразия показателей надежности и является собой последовательную во времени смену исправных, неисправных, но работоспособных и неработоспособных состояний.

К основным характеристикам надежности объекта относятся: долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость [7].

Основными свойствами ремонтной технологичности являются блочность, взаимозаменяемость, восстанавливаемость.

Основными свойствами технологичности при ТО являются контролепригодность, доступность, легкосъемность, возможность опертивного восстановления работоспособности изделия в условиях эксплуатации путем замены (ремонта) поврежденных (выработавших ресурс) изделий или сборочных единиц (модулей), а также сокращение времени, трудоемкости и материальных средств на ремонт и ТО.

К показателям ремонтпригодности относятся среднее время восстановления работоспособности состояния и средняя трудоемкость ремонта и ТО.

Таким образом, рассмотрены основные характеристики надежности в технике и их свойства для формирования смешанной системы управления ТС.

Перспективным направлением поддержания готовности и интенсивности использования КСА, снижения трудоемкости ТО и стоимости эксплуатации является уменьшение объема и увеличение периодичности работ по ТО, исключение из его состава малоэффективных работ, смешанное сочетание методов управления техническим состоянием КСА. В рамках этого направления актуальной задачей является разработка методических подходов для обоснования и назначения периодичности контроля и технического диагностирования.

Из вышеприведенного можно сделать вывод, что для сложных технических систем, к которым относятся КСА, ТО необходимо проводить при рациональном сочетании методов, каждый из которых представляет собой совокупность определенных правил оценки и управления ТС объектов для назначения сроков начала работ по ТО. При этом система правил управления ТС изделий формируется заранее на основе априорной информации об эксплуатационных свойствах парка образцов. Из информации о текущем состоянии используются только сведения об отказах, а концепция управления исходит из предположения, что любой объект может иметь только два определенных состояния: отказ или выработка назначенного ресурса. Объем операций по проведению профилактических работ строго регламентирован и не зависит от фактического состояния авиационной техники, а необходимый уровень ее надежности достигается за счет периодического обновления парка эксплуатируемых изделий. Эта система эксплуатации будет иметь право на существование еще долгое время, так как КСА оснащены рядом изделий, которые быстрее и экономичнее заменить, чем установить степень их износа на основе сложно-го, дорогостоящего, а иногда и не совсем надежного контроля.

Регламент технической эксплуатации разрабатывается в процессе создания КСА специалистами предприятий промышленности, причем при его разработке учитывают две группы факторов.

Первая группа содержит обобщенные материалы по опыту эксплуатации аналогичных типов КСА (перечень работ, периодичность их выполнения, перечень и характер неисправностей по системам, интенсивность их появления и т. п.).

Вторая группа отражает индивидуальные, специфические особенности конкретного изделия (особенности конструкции, предполагаемые условия эксплуатации, результаты стендовых и лабораторных испытаний и т. п.). При определении оптимальной периодичности обслуживания могут использоваться различные критерии. В общем случае оптимальным критерием для регламента является такой, который обеспечивает максимальную надежность работы объекта в межрегламентный период.

Однако на ТС объекта воздействует широкий спектр эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов, воздействие которых влияет на последовательную во времени смену исправных, неисправных, работоспособных и неработоспособных состояний.

Основные характеристики надежности в технике и их свойства для формирования смешанной системы управления ТС необходимо оценивать с учетом [4]: влияния последствий отказов на безопасность полетов, эксплуатационную надежность, эффективность применения (решаемые задачи), затрат на восстановление; характера и интенсивности возникновения отказов; влияния наработки на вероятность отказа; стоимости профилактических работ, проводимых при ТО; характеристик контролепригодности, ремонтпригодности и эксплуатационной

технологичности; количества элементов системы с ограниченным ресурсом по сравнению с ресурсом всей системы; обеспеченности резервом (структурным или функциональным).

Эксплуатационно-технические характеристики КСА обладают рядом свойств, которые могут значительно влиять на выбор метода управления ТС. К основным свойствам эксплуатационно-технических характеристик относятся следующие [5].

1. Свойства безотказности, учитывающие функциональную значимость отказа элемента по уровню его влияния на обеспечение выполнения задачи объектом. Уровень I – отказы элементов, приводящие к невыполнению задачи; уровень II – отказы, влияющие на эффективность выполнения задачи; уровень III – отказы, не влияющие на эффективность выполнения задачи.

2. Свойства безотказности, учитывающие характер проявления отказа элемента. Отказы подразделяются: по характеру изменения параметра до момента возникновения отказа на постепенные и внезапные, по связи с другими отказами на независимые и зависимые, по причине возникновения отказа на конструктивные, производственные и эксплуатационные, по способу устранения последствий отказа на устойчивый и сбой и по возможности использования изделия по назначению после возникновения отказа на полный и частичный.

3. Свойства безотказности, учитывающие среднее время наработки на отказ. Рассматривая сложную систему, можно принять, что уровень безотказности выше у тех элементов, у которых наработка на отказ больше или равна наработке на отказ изделия.

4. Свойства контролепригодности, характеризующие приспособленность составных элементов системы к проведению контроля. Результаты контроля являются исходными данными для управления эксплуатационными процессами.

5. Свойства долговечности, характеризующие достаточность ресурса.

6. Свойства ремонтпригодности, характеризующие среднее время восстановления работоспособного состояния элемента и вероятность восстановления его работоспособного состояния.

7. Свойства эксплуатационной и ремонтной технологичности, характеризующие среднюю трудоемкость и среднюю продолжительность ТО, удельную суммарную стоимость ТО, а также обеспеченность резервом.

Рассмотренные свойства имеют важное значение для формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции КСА. Техническая эксплуатация КСА характеризуется наличием объективного процесса изменения ТС и субъективного процесса технической эксплуатации, представляющего собой последовательную во времени смену различных состояний в соответствии со схемой переходов. В процессе эксплуатации любой технической системы под действием различных факторов происходит непрерывный процесс изменения ее состояния. В разных состояниях система может выполнять заданные функции с разным уровнем качества. Это говорит о том, что значения показателей эффективности функционирования зависят от состояния системы в каждый момент времени  $t$  – выполнения ею своего назначения.

В общем же случае эффективность функционирования КСА зависит от всех предшествующих состояний, т. е. от траектории эволюции состояний функциональных систем  $S(t)$  в динамике ее эксплуатации. Из сказанного следует, что в процессе эксплуатации управление эффективностью системы возможно только через управление процессом изменения ее состояния.

## **МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СМЕШАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Для решения задач многокритериального выбора рассмотрено множество математических методов, которые, в свою очередь, основываются на представлении знаний в виде определенных количественных данных, являющихся оценками экспертов [6].

Наибольшей универсальностью и теоретической обоснованностью среди методов классического подхода обладает метод анализа иерархий (МАИ). Он основан на парных сравнениях

альтернативных вариантов по различным критериям с применением девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по различным целям и критериям. К основным процедурам метода анализа иерархий относятся следующие: генерация множества альтернативных вариантов; формирование множества критериев для оценки альтернативных вариантов; выявление предпочтений экспертов на множестве альтернатив по различным критериям; установление относительной важности влияния критериев на цель выбора и другие критерии; получение ранжированных наборов альтернатив по всем критериям и целям.

Для определения весов критериев наибольшую точность, устойчивость и последовательность дают парные сравнения с использованием шкалы вербальных оценок. Для сравнения альтернатив по каждому критерию предлагается девятибалльная шкала (табл. 1). Баллами 2, 4, 6, 8 могут отмечаться промежуточные суждения эксперта [7].

Метод МАИ предлагает процедуру для определения меры последовательности высказываний эксперта. Чем ближе максимальное собственное значение матрицы парных сравнений  $L_{max}$  к  $N$  (размерности матрицы), тем результат более достоверен и суждения эксперта более последовательны. Степень последовательности суждений в теории МАИ представляется отношением  $(L_{max} - N)/(N - 1)$ , которое называется индексом согласованности ( $IS$ ).  $IS$  случайным образом генерированных матриц с весами от 1 до 9 называют в

теории МАИ случайным индексом ( $SI$ ). Саати провел серию экспериментов на ЭВМ и получил средние экспериментальные значения  $SI$  для  $N = 1 - 15$  (табл. 2). Отношение  $IS$  к среднему  $SI$  для матрицы соответствующей размерности называют отношением согласованности ( $OS$ ). Хорошим считается  $OS \leq 0,10$ . В процессе накопления опыта по оценке приспособленности изделий к эксплуатации по состоянию значения рангов могут быть уточнены. Достоинством метода является то, что отношения предпочтения позволяют сравнивать разнородные свойства объекта между собой. К недостаткам метода следует отнести: с одной стороны, ограниченное количество сравниваемых показателей  $7(\pm 2)$ , связанных с возможностями человека по переработке информации, с другой – необходимость учета свойств этих показателей для более точного принятия решения о применении того или иного метода ТО, что затрудняет решение практической задачи обоснованного выбора комплексного ТО [8].

Таблица 2

Table 2  
Средние экспериментальные значения  $SI$  для  $N = 1 - 15$   
The mean experimental values of  $SI$  for  $N = 1 - 15$

$N$	Случайный индекс
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

управления ТС показал, что область их применения ограничена требуемым уровнем согласованности исходной экспертной информации, а задачи выбора могут быть решены методами

Таблица 1

Table 1

Девятибалльная шкала вербальных оценок  
A nine-point scale of verbal assessments

Степень превосходства	Балл
Отсутствие предпочтительности	1
Слабая предпочтительность	3
Умеренная предпочтительность	5
Сильная предпочтительность	7
Абсолютная предпочтительность	9

Эксперты на первом этапе генерируют множество допустимых альтернатив, среди которых необходимо провести упорядочивание всех элементов или выбрать лучшую. Обычно на этом этапе проводят кластеризацию множества возможных альтернатив или его разумное усечение.

Моделью знаний конкретной предметной области является иерархическая структура критериев и целей, которую уточняют и изменяют с течением времени.

Метод парных сравнений является основным способом измерения предпочтений для экспертов, используемым в МАИ. Эксперту необходимо попарно сравнить все альтернативы по каждому критерию и дать оценку предпочтительности.

Анализ математических методов и подходов к решению задачи классификации и выбора методов



МАИ только при полном объеме исходной информации и допустимом уровне согласованности экспертных оценок.

Рассмотренные выше основные эксплуатационно-технические характеристики, обуславливающие выбор смешанной системы управления ТС конкретного объекта, могут иметь от двух до пяти свойств, что затрудняет применение метода анализа иерархий.

С целью снижения уровня несогласованности информации для расширения области применения метода анализа иерархий возникает необходимость в разработке метода и устройства для его реализации, позволяющего учитывать основные свойства эксплуатационно-технических характеристик путем введения дополнительных процедур.

Для устранения недостатков МАИ предлагается модернизированный метод, позволяющий учитывать не только ранг (вес), характеризующий относительную важность характеристик, а и влияние свойств этих характеристик при выборе методов управления ТС.

Содержание метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции КСА по характеристикам и их свойствам заключается в следующем [9]:

пусть  $\Omega = \{\Omega_l\}$ ,  $l = 1, 2, 3$  – существующие базовые методы управления ТС;

$\Gamma = \{\gamma_i\}$ ,  $i = 1, \eta$  – множество ранжированных эксплуатационно-технических характеристик, полученных в результате определения весов  $w_i$  этих характеристик при применении процедур МАИ.

Полученное множество характеристик отражает степень их влияния на выбор метода управления ТС. Введем дополнительные процедуры, позволяющие учитывать свойства  $\gamma_{i,j}$  показателей  $\gamma_i$ , где  $j = 1, J_i$  – количество свойств показателя  $\gamma_i$ .

Алгоритм выбора метода управления ТС состоит из следующих этапов [10, 11]:

Шаг 1. Определение оценки  $\Omega_{l,i,j}$  принадлежности свойства  $\gamma_{i,j}$  характеристики  $\gamma_i$  методу управления ТС  $\Omega_l$ :

$$\Omega_{l,i,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } \gamma_{i,j} \notin \Omega_l; \\ 1, & \text{если } \gamma_{i,j} \in \Omega_l. \end{cases} \quad (1)$$

Шаг 2. Определение количества свойств  $j$  характеристики  $i$ , принадлежащих методу  $\Omega_l$  с учетом  $w_i$ :

$$\Omega_{l,i} = w_i \sum_{j=1}^{J_i} \Omega_{l,i,j}. \quad (2)$$

Шаг 3. Определение общего количества свойств всех характеристик  $\Omega_l^0$ , принадлежащих методу  $\Omega_l$ :

$$\Omega_l^0 = \sum_{i=1}^{\eta} \Omega_{l,i}. \quad (3)$$

Шаг 4. Вычисление относительного коэффициента  $\Theta_l$ :

$$\Theta_l = \frac{\Omega_l^0}{\Xi}, \quad (4)$$

где  $\Xi = \sum_{i=1}^{\eta} J_i$ .

Шаг 5. Выбор наиболее оптимального метода управления ТС:

$$\Omega_{l_3} \Leftrightarrow l_3 = \arg \max_l \Theta_l \quad (5)$$

Алгоритм выбора метода управления ТС представлен в табл. 3.

Таблица 3  
Table 3

Алгоритм выбора метода управления ТС  
Algorithm for choosing the method of control of the vehicle

$\Gamma$	$W_i$	$\gamma_{ij}$	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$
$\gamma_1$	$w_1$	$\gamma_{11}$	0	1	0
		$\gamma_{12}$	1	0	1
		$\gamma_{13}$	0	1	
		3	$\Omega_{1,1} = 1$	$\Omega_{2,1} = 2$	$\Omega_{3,1} = 2$
$\gamma_2$	$w_2$	$\gamma_{21}$	1	0	1
		$\gamma_{22}$	0	1	0
		2	$\Omega_{1,2} = 1$	$\Omega_{2,2} = 1$	$\Omega_{3,2} = 1$
$\gamma_i$	$w_i$	–	–	–	–
$\gamma_\eta$	$w_\eta$	$\gamma_{\eta 1}$	0	1	0
		$\gamma_{\eta 2}$	1	0	1
		$\gamma_{\eta 3}$	0	0	1
		3	$\Omega_{1,\eta} = 1$	$\Omega_{2,\eta} = 2$	$\Omega_{3,\eta} = 2$
	$\sum w_i = 1$	$\Xi=8$	$\Omega_1^0$	$\Omega_2^0$	$\Omega_3^0$
			$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$
			Максимум $\Theta_l$		
$l_3$					

Разработанный алгоритм позволяет для каждого элемента КТС найти наиболее эффективный метод управления ТС с целью прогнозирования периода и объема ПР.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техническая эксплуатация КСА характеризуется наличием объективного процесса изменения ТС и субъективного процесса технической эксплуатации, представляющего собой последовательную во времени смену различных состояний в соответствии со схемой переходов.

Содержание модернизированного метода формирования смешанной системы управления ТС на основе декомпозиции КСА по характеристикам позволяет учитывать основные свойства эксплуатационно-технических характеристик путем введения дополнительных процедур. Он позволяет учитывать не только ранг (вес), характеризующий относительную важность характеристик, но и влияние свойств этих характеристик при выборе методов управления ТС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В.Г. Основы теории автоматизированных систем управления / В.Г. Тарасов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1988. 437 с.

2. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. / Т. Саати, К. Кернс. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
3. Gertler J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. IEEE Control Systems Magazine, 1988, Vol. 21, № 4, pp. 361–376.
4. Isermann R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. Ibid, 1993, Vol. 29, № 4, pp. 815–835.
5. Frank P. M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. Automatica, 1990, Vol. 26, № 3, pp. 459–474.
6. Барзилович Е.Ю. Оптимальные модели эксплуатации РЭО самолетов ВВС: научно-методические материалы / Е.Ю. Барзилович. М.: ВВАИ им. Н.Е. Жуковского, 1982. 148 с.
7. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П.С. Давыдов. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
8. Isermann R. Process fault detection based on modelling and estimation methods – survey. Automatica, 1984, Vol. 20, № 4, pp. 387–404.
9. Isermann R. Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1994, 305 p.
10. Лебедев В.В. Оптимизация методов технического обслуживания радиотехнических систем / В.В. Лебедев, С.Н. Моисеев [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 14. С. 178–181.
11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2007610585 Российская Федерация. Оптимизация периодичности и объема профилактических работ при планировании и организации технического обслуживания комплексов («ОПОПР – ПОТОК») / В.В. Лебедев, А.Н. Потапов; заявитель и правообладатель В.В. Лебедев. № 2006614190; заявл. 08.12.06; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 06.02.07. 1 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бунин Александр Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта Московского государственного технического университета гражданской авиации, a.bunin@mstuca.aero.

**Потапов Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов) ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж), potapov\_il@mail.ru.

**Буешев Ерик Еркинович**, заместитель начальника кафедры эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов) ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж), potapov\_il@mail.ru.

### THE MODERNIZED METHOD OF A MIXED TECHNICAL STATE CONTROL SYSTEM FORMATION BASED ON THE DECOMPOSITION OF RADIO AIDS COMPLEXES

Alexander V. Bunin<sup>1</sup>, Andrey N. Potapov<sup>2</sup>, Erik E. Bueshev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

<sup>2</sup>The Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia

#### ABSTRACT

During the operation of the machinery, units and blocks are constantly affected by a number of characteristics which influence its technical condition (TC) in different ways. The choice of the radio engineering complexes of automation equipment technical state control method for air traffic control (ATC) is determined by a number of constructive, tech-

nological and operational characteristics. The effect of operational characteristics on objects TC is reflected in the form of deviations from the nominal values of their parameters. The stochastic nature and the variety of the operational characteristics impacts on the automation equipment complexes lead to the fact that for the same runtime or duration of operation the objects have different actual TC. The operational characteristics of the automation equipment complexes have a number of properties, which can significantly influence the choice of the TC control method. The technical operation of the automation equipment complexes is characterized by the presence of the changing objective process of the TC and the subjective technical maintenance process, which is a sequential in time change of various states in accordance with the transition scheme. The proposed modernized method of a mixed technical state control system formation is based on the decomposition of radio aids complexes and it provides the opportunity to take into account not only the rank (significance), which characterize the relative importance of the characteristics, but also the influence of the properties of these characteristics in the choice of the TC control methods.

**Key words:** complex of means of automation, method, technical condition, characteristics, control system, decomposition, radio engineering means.

## REFERENCES

1. **Tarasov V.G.** *Osnovy teorii avtomatizirovannyh sistem upravlenija* [Theoretical ACS basics]. M., Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1988. 437 p. (in Russian)
2. **Saati T., Kerns K.** *Analiticheskoe planirovanie. Organizacija sistem* [Analytical planning. The Organization of Systems]. Transl. from English. M., Radio and communication, 1991, 224 p. (in Russian)
3. **Gertler J.** Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. IEEE Control Systems Magazine, 1988, Vol. 21, № 4, pp. 361–376.
4. **Isermann R.** Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. Ibid., 1993, Vol. 29, № 4, pp. 815–835.
5. **Frank P.M.** Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. Automatica, 1990, Vol. 26, №3, pp. 459–474.
6. **Barzilovich E.Yu.** *Optimal'nye modeli jekspluatacii RJeO samoletov VVS: nauchno-metodicheskie materialy* [Optimal models for REO Air Force aircraft operation: scientific and methodological materials]. M., Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1982, 148 p. (in Russian)
7. **Davydov P.S.** *Tehnicheskaja diagnostika radioelektronnyh ustrojstv i sistem* [Technical diagnostics of radio electronic equipment and systems]. M., Radio and Communication, 1988, 256 p. (in Russian)
8. **Isermann R.** Process fault detection based on modelling and estimation methods – survey. Automatica, 1984, Vol. 20, № 4, pp. 387–404.
9. **Isermann R.** *Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen.* Dusseldorf, VDI-Verlag, 1994, 305 p.
10. **Lebedev V.V.** *Optimizatsiya metodov tehničeskogo obsluzhivania radiotehničeskikh sistem* [Optimization of methods in the radio engineering systems' technical maintenance]. Bulletin of Kazan Technological University, No. 14, 2013, pp. 178–181. (in Russian)
11. **Lebedev V.V., Potapov A.N.** *Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM 2007610585 Rossijskaja Federacija. Optimizacija periodičnosti i ob"ema profilaktičeskikh rabot pri planirovanii i organizacii tehničeskogo obsluzhivanija kompleksov («OPOPR – POTOK»)* [Optimization of maintenance work frequency and volume during planning and organization of “OPOPR-POTOK” systems operation]. Applicant and copyright holder V.V.Lebedev. №2006614190; appl.08.12.06; registered in Software Register, Rospatent 06.02.07. 1 p. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexander V. Bunin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft Avionic Equipment Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.bunin@mstuca.aero.

**Andrey N. Potapov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, the Deputy Head of the Radio Engineering Aids Maintenance Chair (flight support) VUNTS VVA VVA (Voronezh), potapov\_il@mail.ru.

**Erik E. Bueshev**, the Deputy Head of the Radio Engineering Aids Maintenance Chair (flight support) of the VUNTS VVA VVA, potapov\_il@mail.ru.

Поступила в редакцию 31.08.2017  
Принята в печать 20.09 .2017

Received 31.08.2017  
Accepted for publication 20.09 .2017