

УДК 004.5

А. Г. Додонов, В. Г. Путятин

Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

О системном подходе при разработке и полигонных испытаниях бортовых автоматизированных корабельных комплексов обнаружения и целеуказания

Рассмотрены вопросы анализа и развития основных научных проблем разработки методологии системного проектирования и полигонных испытаний бортовых автоматизированных корабельных комплексов обнаружения и целеуказания.

Ключевые слова: система, системный подход, методология, комплекс, испытания.

Введение

На эффективность боевого применения корабельных систем оружия (КСО) существенно влияют «обеспечивающие» системы и, прежде всего, системы разведки и целеуказания, включая корабельные радиолокационные комплексы (РЛК) и системы. Важную роль в обеспечении боевых и функциональных возможностей КСО играют автоматизированные корабельные комплексы обнаружения и целеуказания (АККОЦУ), представляющие собой совокупность систем радиолокационных, радиотехнических и вычислительных средств (КРТС и ВС), являющиеся неотъемлемыми составными частями КСО и размещаемые на надводных кораблях (НК) тактической группы [1].

Примерами таких систем и подсистем АККОЦУ могут служить:

1) РЛК базового ряда «Монолит» — предназначены для активного и пассивного обнаружения надводных целей (НЦ), обеспечения выработки и выдачи целеуказания (ЦУ) в корабельную систему управления (КСУ) ударным ракетным оружием (УРО), решения навигационных задач и управления совместными боевыми действиями (б/д) [2]. Включают относительно самостоятельные модули: пассивную РЛС обнаружения и целеуказания; радиотехническую станцию радиолокационного обнаружения НЦ и обработки информации, поступающей от авиационного выносного наблюдательного поста; радиотехническую станцию взаимного обмена информацией и взаимного ориентирования (ВЗОИ-ВЗОР), увязывающую пространственно-разнесенные источники информации и УРО отдельных НК в единую систему обнаружения целей и использования оружия в масштабе тактической

группы кораблей (ТГК), и передачи данных ЦУ в интересах управления совместными б/д кораблей ТГ;

2) радиотехническая комплексная система «Титанит» — представляет собой радиолокационный многорежимный цифровой корабельный комплекс [3], предназначенный для поиска, сопровождения и идентификации (определения типов) НЦ, определения элементов движения целей и выдачи ЦУ в сопряженную с ней КСУ УРО;

3) многофункциональный РЛК «Заслон» для перспективных НК — предназначен для освещения воздушной, надводной и радиотехнической обстановки активными и пассивными радиолокационными каналами; выдачи целеуказания КСУ оружием; управления корабельными артиллерийскими установками [4];

4) американская многофункциональная РЛС морского базирования ПРО США (SBX-I — Sea-Based X-Band Radar), называемая также «морской радар», — предназначена для обнаружения и слежения за космическими объектами, в том числе высокоскоростными и малоразмерными, а также для выдачи ЦУ средствам поражения [5];

5) американская корабельная многофункциональная боевая информационно-управляющая система Иджис — представляет собой интегрированную сеть корабельных средств освещения обстановки, средств поражения, таких как зенитные управляемые ракеты SM-2 и SM-3, и средств управления, формирующуюся на базе широкого внедрения автоматизированных систем боевого управления. Система позволяет принимать и обрабатывать информацию с датчиков других кораблей и летательных аппаратов соединения и выдавать ЦУ на их пусковые установки [6];

6) многофункциональная интегрированная радиолокационная система освещения воздушной и надводной обстановки, целераспределения и выдачи ЦУ средствам ПВО, ПРО и УРО для кораблей различного ранга, обеспечивающей решение задач самообороны и обороны в составе группировки кораблей [7];

7) корабельная система обработки радиолокационной информации и целеуказания «Пойма-Э» — предназначена для сбора, обработки и отображения информации о воздушных и надводных целях от корабельных РЛС и выдачи ЦУ огневым средствам [8];

8) корабельные РЛС «Подберезовик-Э», «Подберезовик-ЭТ1» и «Подберезовик-ЭТ2» — предназначены для обнаружения и измерения координат воздушных и надводных целей, в том числе высокоскоростных малоразмерных низколетящих целей, на фоне естественных и организованных активных и пассивных помех и обеспечения ЦУ огневым средствам, устанавливаемым на НК среднего и большого водоизмещения и на радиотехнических постах берегового наблюдения [9];

9) корабельный РЛК «Минерал-Э», «Минерал-МЭ» — предназначен для выработки и выдачи данных ЦУ в системы управления УРО и управления совместными б/д кораблей ТГ [10];

10) корабельная РЛС обнаружения воздушных и надводных целей МР-352 — предназначена для оснащения малых НК и обеспечивает решение задач: освещение воздушной и надводной обстановки в интересах эффективного использования огневых средств; определение степени угрозы целей; выработка ЦУ ракетному и артиллерийскому оружию [11].

Разработка бортовых АККОЦУ, состоящих из подсистем и устройств на разнородных физических принципах функционирования, с высокими показателями качества P_k и в сжатые сроки при ограниченном финансировании проектов, представляет собой комплексную научно-техническую проблему, требующую для своего решения проведения разноплановых фундаментальных и прикладных исследований в области проектирования и натурных испытаний АККОЦУ как сложных многофункциональных систем (МФС). Совокупность задач исследования, проектирования и натурных испытаний таких сложно организованных МФС представляет собой комплексную проблему, связанную с развитием нового научного направления: формированием теоретических основ разработки и полигонных испытаний АККОЦУ, включающих разработку стратегии проектирования, единой методологии испытаний и совершенствование опытно-теоретического метода исследований, ориентированных на широкое применение средств вычислительной техники, автоматизации проектирования и испытаний. Решение этой проблемы будет способствовать созданию научно-технического задела и явится ключом к обеспечению высоких P_k комплекса.

Возрастание сложности и системности проблем, возникающих при создании АККОЦУ, требует совершенствования методов их разработки, применения методов, базирующихся на ряде положений современной теории систем и системотехники.

Целью работы является обобщение основных научных проблем разработки и полигонных испытаний АККОЦУ как СОТС, разработки методологии системного проектирования и испытаний бортовых АККОЦУ.

Методология системного проектирования и испытаний бортовых АККОЦУ отличается от известных методологий тем, что в ней с единых системных позиций рассматриваются вопросы исследования, проектирования, натурных и полигонных испытаний, функционирования комплексов с учетом прохождения системой всех стадий жизненного цикла и широкого применения на всех стадиях математического и полунатурного моделирования, средств автоматизации проектирования и испытаний [12, 13]; создание на единой системной основе методологии проектирования (решения задач анализа, оценки и выбора оптимального технического облика комплекса в условиях многокритериальности) и полигонных испытаний (теории и методологии испытаний, опытно-теоретического метода получения достоверных оценок тактико-технических характеристик (ТТХ) комплекса, планирования обеспечения испытаний), позволяющей повысить эффективность разработки АККОЦУ и заполнить некоторые пробелы в системном проектировании и теории испытаний комплекса как сложной системы.

Бортовые АККОЦУ обладают всеми наиболее характерными чертами СОТС. К ним следует отнести: большой масштаб систем по числу составляющих элементов и выполняемых функций; наличие функциональной целостности, общего назначения и цели; сложную многоуровневую иерархическую структуру; высокую степень автоматизации, определяющую известную степень самостоятельности поведения системы; статистически распределенные во времени внешние воздействия. Бортовым АККОЦУ присущ ряд характерных свойств, связанных с использованием электромагнитного поля [14] для организации информационного взаимодействия между разнесенными в пространстве КРТС и ВС и объектами

(надводными и воздушными). Специфические особенности таких современных комплексов (разветвленная иерархическая структура со сложными связями между подсистемами и элементами; многокритериальность; многообразие структур и природы подсистем; уникальность технических решений; жесткие требования к R_k ; большая трудоемкость разработки; многоплановость (в научном отношении) делают проблему формирования теоретических основ разработки и полигонных испытаний комплекса важной и актуальной, решение которой существенно повышает эффективность их разработки.

Состояние проблемы

Состояние проблемы с разработкой на единой системной основе методологии проектирования и полигонных испытаний бортовых АККОЦУ в мировой практике можно охарактеризовать в целом как неблагоприятное. Среди разработчиков бытует недооценка системного подхода к разработке методологии системного проектирования и испытаний такого класса систем. Во многих предприятиях-разработчиках систем из-за ведомственной разобщенности методология проектирования и испытаний является тщательно охраняемой интеллектуальной собственностью, недоступной широкому кругу специалистов. Следует отметить также острую нехватку научных работ по организации проектирования и полигонных испытаний комплекса. Имеющаяся по этой проблеме литература, к сожалению, страдает однобокостью, сосредоточивая внимание разработчиков на частных аспектах, не давая ответа на многие актуальные вопросы, возникающие перед разработчиком комплекса (системы) на практике.

Под системным подходом к проектированию понимается [15] такое проектирование, при котором технический облик любого элемента «большой» системы выбирается с учетом многоаспектных «интересов» всех взаимодействующих подсистем более высокого ранга, содержащих исследуемый объект. Основное назначение системного подхода к разработке бортовых АККОЦУ состоит в правильной и четкой постановке задачи *оптимального* проектирования комплекса, правильном выборе системного инструментария для решения поставленной задачи, декомпозиции и конкретизации задачи, формировании альтернативных путей построения комплекса, выработке наилучшего варианта построения комплекса, разработки методологии подготовки и проведения всех видов испытаний комплекса в лабораторных, полунатурных, натуральных и полигонных условиях [16, 17].

В основу разработки бортовых АККОЦУ, как и прочих автоматизированных боевых информационно-управляющих систем положены следующие принципы системного подхода: новых задач, системного подхода, первого руководителя, непрерывного развития системы, автоматизации документооборота, согласованности пропускных способностей отдельных частей системы, типовости, однократности ввода данных и др. При проектировании бортовых АККОЦУ разработчиками вырабатывается самостоятельный подход к решению задач проектирования, учитывающий перечисленные выше принципы.

Трудов, в которых бы последовательно, со строгой научно-практической направленностью, излагались теоретические и методологические вопросы проектирования и испытаний бортовых АККОЦУ, практически нет.

Опыт создания таких комплексов убедительно подтверждают необходимость всестороннего (системного) рассмотрения всей совокупности проблем, возникающих при их разработке. Особую актуальность, в этой связи, приобретают вопросы обобщения существующего опыта по указанным выше проблемам, выделение основных направлений исследований в области проектирования и полигонных испытаний АККОЦУ.

В настоящее время общепризнано [18], что пути повышения эффективности разработок СОТС в основном лежат в направлении совершенствования методов и моделей их проектирования и испытаний, а создание систем невозможно сегодня без привлечения системных методов и реализации принципов системного подхода. Именно по этим причинам с ростом сложности и многогранности КРТС и ВС в научном отношении становится очевидной необходимость системного подхода к проектированию перспективных комплексов или, по крайней мере, наиболее крупных его подсистем. Такого рода вопросам в отечественной и зарубежной литературе придается существенное значение.

Основной материал

Достижение поставленной цели предполагает проведение разносторонних исследований по следующим основным направлениям: обобщение принципов системного подхода при выборе оптимального технического облика комплекса (структуры, состава и степени избыточности входящих в комплекс подсистем) и разработке научного обеспечения полигонных испытаний комплекса; разработка на единой системной основе взаимоувязанной методологии проектирования и полигонных испытаний комплекса; разработка теоретических основ и математических моделей исследования структурно-функционального построения комплекса в целом и его подсистем; разработка и исследование методов, моделей и алгоритмов выбора оптимального по совокупности аддитивных показателей качества варианта технической реализации системы; разработка и исследование методов, моделей и алгоритмов анализа структурной надежности комплекса как системы со сложной структурной организацией при достаточно общих предположениях относительно законов распределения времен безотказной работы ($T_{бр}$) и восстановления ($T_в$) составных частей комплекса; разработка теоретических основ и рациональной методологии обеспечения натуральных и полигонных испытаний комплекса и проектирования полигонных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК); развитие опытно-теоретического метода получения достоверной оценки тактико-технических характеристик комплекса.

Решение задач проектирования бортовых АККОЦУ возможно с применением системного подхода к задачам проектирования, включая разработку достаточно сложных математических и компьютерных имитационных моделей подсистем и АККОЦУ в целом.

Суть системного подхода к проектированию АККОЦУ состоит в анализе задачи проектирования комплекса в целом с развитием этой задачи до уровня отдельных подсистем при максимально полном учете всех доминирующих альтернативных проектных решений, часто конфликтных и плохо определенных. Особенность системного проектирования АККОЦУ состоит в организации работ по

принципу «сверху-вниз», когда процесс проектирования рассматривается как последовательная трансляция описаний верхнего уровня в описания нижних уровней, и по принципу «снизу-вверх», когда независимо разработанные функциональные подсистемы объединяются в общую систему.

На практике задача проектирования каждого нового образца АККОЦУ (выбор технического облика) ставится как научная проблема, требующая своей специализированной теории и методологии. При этом теория и методология проектирования и испытаний таких комплексов представляют собой достаточно сложную системную проблему и создаются для класса систем, каждый проект которых является уникальным. В работе [19] приведены задачи, решаемые при выборе технического облика комплекса, и описан процесс автоматизированного выбора технического облика бортового АККОЦУ.

Теоретический анализ и обобщение принципов и методов системного подхода к проектированию сложных систем, а также анализ практики проектирования ряда современных корабельных РЛК позволили разработать на единой системной основе методологию проектирования АККОЦУ, суть которой заключается в организации процесса системного проектирования с использованием логической схемы проектирования. Логическая схема проектирования определяет широкий круг задач проектирования: определение общей структуры комплекса, организацию взаимодействия между подсистемами и элементами, учет функционирования и управления АККОЦУ, оценку эффективности его применения по прямому назначению. С помощью данной схемы решается задача методологического и организационного сопряжения стадий локальной оптимизации подсистем и интегрального процесса оптимизации системы в целом [18].

Логическая схема проектирования отражает процесс проектирования в некотором пространстве проектных задач как многоэтапный процесс с итеративной структурой каждого этапа. На каждом из этапов проектирования осуществляется поиск оптимальных технических решений путем реализации «по шагам» трех классов задач: декомпозиции, генерирования множества альтернативных вариантов проектных решений, оценки и выбора по совокупности P_k оптимального варианта проектного решения.

При реализации системного подхода к проектированию АККОЦУ нам представляется целесообразной следующая последовательность работ.

1. Анализ задач радиолокационного обеспечения объекта-носителя комплекса и оружия.
2. Анализ систем, имеющихся на вооружении (или находящихся в стадии разработки), во взаимодействии с которыми работает исследуемый комплекс.
3. Формулировка целей создания комплекса, анализ требований к нему (сравнение с ТТЗ), проверка ТТЗ на корректность и осуществимость, обоснование целевой функции проектирования комплекса, определение места разрабатываемого комплекса в глобальной системе.
4. Разработка вариантов структурно-функционального построения комплекса. Оценка, сравнение, и выбор рационального варианта технического облика комплекса в условиях многокритериальности с точки зрения выполнения ТТЗ.

5. Декомпозиция комплекса на подсистемы. Выбор критериев эффективности подсистем исходя из общего критерия и задач, решаемых комплексом. Определение степени автоматизации и места человека-оператора в управлении комплексом.

6. Разработка общего и частных алгоритмов функционирования комплекса, увязка алгоритмов. Формирование потоков требований на обработку.

7. Разработка вариантов построения системы обработки информации.

В работе [19] рассмотрена задача формирования альтернативных проектных вариантов КРТС и ВС с помощью формализованных методов, которые адекватны сложности проектируемых систем и позволяют полнее учитывать в процессе проектирования существующую априорную информацию о комплексе. Процесс построения множества вариантов КРТС и ВС отображается с помощью общего дерева альтернатив — задач и технической реализации.

Одной из важных задач при системном проектировании АККОЦУ является разработка показателей оценки его эффективности. В работе [20] рассмотрен подход и предложен метод оценки эффективности функционирования АККОЦУ, в основу которого положено представление комплекса в виде сложной измерительной системы, использование информационных показателей качества полученной измерительной информации, анализ решаемых комплексом обобщенной задачи по обнаружению целей и задачи по измерению координат целей. Получены выражения для интегральных показателей оценки уровня эффективности функционирования комплекса по обнаружению целей в зависимости от характеристик внешней среды и по решению задачи измерения координат цели в зависимости от ТТХ комплекса.

Одним из пробелов в практике проектирования бортовых АККОЦУ является отсутствие в отечественных стандартах четких рекомендаций, касающихся выработки общесистемных проектных решений. Это, в первую очередь, относится к формализованному представлению структуры комплекса и порядку его взаимодействия с внешней средой.

Системный подход предполагает с позиций системной методологии с использованием ее основных принципов выполнение исследования структурно-функционального построения реальных бортовых АККОЦУ. Суть исследований состоит в системной трактовке целевого назначения и уровней иерархии комплекса, анализе основных стадий жизненного цикла системы и возникающих на них проблемах анализа и синтеза, формализованном описании комплекса. Основная цель, которая должна преследоваться при разработке моделей, состоит в том, чтобы получить достаточно наглядное средство взаимодействия между разработчиком и заказчиком при определении требований к системе и принятии общесистемных проектных решений.

Рассматриваемый ниже в качестве примера многофункциональный комплекс с иерархической структурой предназначен для дальнего обнаружения НЦ, определения их координат и элементов движения целей, выдачи данных ЦУ УРО. На комплекс также возлагаются задачи управления боевыми действиями тактической группы боевых кораблей при подготовке и нанесении ими ракетного удара. Многофункциональность АККОЦУ проявляется в широком смысле — комплекс выполняет много функций, а одни и те же функции (обнаружения, сопровожде-

ния, ЦУ) могут выполнять различные подсистемы, причем каждая из них, в зависимости от конкретных боевых условий, обладает различным уровнем эффективности. Иерархичность структуры проявляется в определенной соподчиненности подсистем, наличии нескольких уровней функционирования, возможности описания с различной степенью детализации.

Выделены пять уровней детализации: 1) уровень АККОЦУ как сложной системы; 2) локальные подсистемы (модули) — взаимосвязанные совокупности подсистем, обеспечивающие функционирование комплекса в целом и характеризующиеся собственными локальными целями; 3) функциональные подсистемы (каналы), каждая из которых охватывает один или несколько функциональных блоков — это аппаратура, обеспечивающая функционирование локальных подсистем; 4) функциональные блоки (приборы), обеспечивающие работу функциональных подсистем; 5) функциональные звенья (элементы), обеспечивающие непосредственное выполнение процесса функционирования с целью получения конкретного результата.

В соответствии с назначением комплекса с использованием декомпозиции его структуры и технических средств выделено шесть групп задач соответствующих локальным подсистемам: 1) активное радиолокационное обнаружение и определение координат и элементов движения цели; 2) дальнее обнаружение кораблей и соединений кораблей, их активных РЛС и определение координат надводных объектов (целей), находящихся за горизонтом; 3) обнаружение и определение координат и элементов движения цели по данным морской радиолокационной системы разведки и целеуказания или морской космической разведки и целеуказания; 4) обнаружение и определение координат и элементов движения цели по данным корабельного выносного наблюдательного поста при решении частных задач (например, корректировка артиллерийского или ракетного огня); 5) обмен информацией, определение взаимного положения и пересчет координат корабельной группы; 6) получение, обработка информации, принятие решения.

Принцип действия АККОЦУ основывается на получении информации о надводной обстановке в масштабе тактической группы кораблей различными радиотехническими способами, отличными по физическим принципам функционирования при комплексном использовании антенных устройств, аппаратуры приема, обработки, управления и отображения информации и приборов сопряжения с корабельными системами. Вычислительные средства комплекса при этом решают задачи оптимизации принимаемых решений, преобразования и переработки потоков разнородной информации.

Системный подход предполагает разработку математического описания и логических алгоритмов реализации решаемых функциональных задач, рассмотрения и описания принципов структурно-функционального построения АККОЦУ в различных режимах работы, разработку соответствующих им моделей функционирования, математического описания задач, решаемых в комплексе в реальном времени.

Декомпозиция задач проектирования АККОЦУ

Одним из основных приемов, используемых при проектировании АККОЦУ «по шагам», является декомпозиция. Путем декомпозиции осуществляется сведе-

ние единой сложной слабо связанной задачи проектирования АККОЦУ к множеству локальных подзадач, где локальность понимается в смысле тенденции подзадач к сепарабельности по переменным, то есть поведение каждой подзадачи почти полностью определяется подмножеством переменных исходной задачи проектирования (оптимизации), в то время как остальные переменные оказывают на нее весьма ограниченное влияние. Можно выделить три основных принципа выделения (декомпозиции) локальных подсистем:

1) в основе иерархической структуры S_{Σ} комплекса как системы должна лежать иерархическая структура целей Z_{Σ} функционирования АККОЦУ;

2) выделяемые подсистемы P_i должны иметь свои цели Z_i , подчиняющиеся общей цели Z_{Σ} , то есть

$$Z_{\Sigma} = \bigcap_{i \in I} Z_i(P_i),$$

где Z_{Σ} — цель АККОЦУ; $Z_i(P_i), i \in [1 : I]$ — цели подсистем нижнего уровня.

В свою очередь, для каждой i -й цели Z_i имеет место

$$Z_i = \bigcap_{j=1}^Y Z_{ij},$$

то есть она представляет собой пересечение некоторого непустого множества целей $Z_{ij} = (Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{ij})$, где I и Y — некоторые натуральные числа;

3) выделяемые подсистемы должны являться определенной частью управления АККОЦУ, выход которых служит входом для следующей части, то есть должна обеспечиваться целостность структуры управления.

При проектировании АККОЦУ иерархическую структуру целей можно построить с помощью двух групп методов. Первую группу составляют методы целевого или целенаправленного подхода, методы декомпозиции или дезагрегации, метод «дерева целей». Это методы построения структуры целей «сверху». Вторую группу составляют методы морфологического подхода (или метод Цвикки), лингвистического или семиотического подхода, тезаурусного подхода или метода «языка системы», терминального подхода, метода композиции и др. Это методы построения структуры целей «снизу». Наиболее удобным представляется описывать иерархию целей АККОЦУ в терминах графов. Прадерево G называется иерархией над множеством объектов Z_{Σ} , если: его вершины являются некоторыми подмножествами множества Z_{Σ} , и при этом корнем G является Z_{Σ} ; множества $Z_{jk}, k \in [1 : k]$ на концах дуг, исходящих из вершин Z_{jk} , удовлетворяют условиям: $\bigcup_{i=1} Z_{ji} = Z_j, Z_{jl} = \bigcap Z_{js} = \emptyset, l, s \in [1 : k]$, где висячими вершинами прадеревя G являются объекты множества Z_{Σ} .

При этом вершина (множества) Z_i принадлежит r -му уровню иерархии, если путь от корня прадеревя G до Z_i содержит r дуг. Таким образом, дерево целей (задач) АККОЦУ может быть построено на основе использования логической

функции ИЛИ и отражает структуру всех задач, решение которых необходимо для достижения глобальной цели Z_{Σ} . По мере разукрупнения задач на каждом уровне прадерева G образуются независимые друг от друга группы задач, замыкающиеся (объединяемые) на одну цель (задачу) верхнего уровня (если дерево разворачивается сверху вниз). Рассмотрение АККОЦУ, целостная структура которого не исключает, а наоборот, предполагает относительную самостоятельность его частей (подсистем, каналов, приборов), позволяет выделить в них собственные локальные цели подсистем Z_j , подчиненные главной цели Z_{Σ} ; в каналах выделить собственные цели Z_{jk} , подчиненные цели Z_j и т.д. Для образования «системы» любого уровня необходимо объединить множество «систем» низшего уровня, принадлежащих только данной высшей «системе».

Оценка живучести КРТС и ВС при выполнении боевых действий

На основе теории потенциальной эффективности сложных систем разработана теоретико-игровая модель, позволяющая исследовать и оценивать живучесть и эффективность КРТС и ВС кораблей тактической группы в ходе боевых действий с противником [20]. Практика создания и эксплуатации КРТС и ВС показывает, что проблема обеспечения необходимых уровней эффективности, надежности и живучести имеет первостепенное значение. К настоящему времени в рамках общей теории сложных систем существует ряд направлений и подходов, ориентированных на решение этой проблемы и связанных с ней задач, отличающихся как уровнями обобщения исследуемой системы, так и этапами существования системы. Одним из направлений в исследовании данной проблемы является теория потенциальной эффективности сложных систем, которая базируется на поведенческом характере систем. В рамках этой теории в настоящей работе рассматривается вопрос оценки живучести и эффективности КРТС и ВС.

Под живучестью понимается способность систем к сохранению своих основных функций (хотя бы с допустимой потерей качества их выполнения) при воздействии факторов внешней среды катастрофического характера — неблагоприятных воздействий, выходящих за рамки проектных условий эксплуатации. Под живучестью системы будем понимать ее качество активно с помощью соответствующим образом организованной структуры противостоять вредным воздействиям внешней среды или другой системы [20].

В работе [20] исследована задача оценки живучести и эффективности системы, состоящей из тактической группы кораблей, оснащенных КРТС и ВС, в ходе боевых действий с противником в рамках теоретико-игрового подхода. Рассмотрен метод оценки эффективности АККОЦУ как сложной системы. С учетом возможных состояний и «значимости» подсистем комплекса предложена формула, позволяющая проводить оценку ожидаемого значения эффективности всех зон, составляющих зону действия комплекса. Для оценки эффективности комплекса, с учетом показателей надежности, предложено использовать нормативный показатель — коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$, который показывает, какая часть номинальной эффективности комплекса сохраняется при наличии отказов подсистем. Он определяется как сумма средневзвешенных значений эффективности для всех возможных состояний, в которых может находиться комплекс. При

расчете $K_{эф}$ проводится анализ и оценка основных показателей надежности: наработки на отказ T (интенсивности отказов), среднего времени восстановления $T_в$ (интенсивности восстановления). Кроме этих данных для расчета $K_{эф}$ необходимы значения вероятности нормального функционирования и дальних границ зон действия подсистем. Суть предложенного метода оценки эффективности комплекса состоит в том, что усреднения проводятся не по всем траекториям, а только по тем, которые соответствуют пребыванию подсистемы в работоспособном состоянии от начала и до конца работы.

Исследуем задачу оценки эффективности поведения АККОЦУ кораблей тактической группы при выполнении боевых действий. Исследования проведем на основе использования следующей модели системы массового обслуживания (СМО). Поскольку количество требований в рассматриваемом случае является конечным и постоянным, рассмотрим замкнутую СМО. При этом предполагается, что источник требований имеет интенсивность, пропорциональную количеству содержащихся в нем требований. Обозначим через m — количество требований, принимающих участие в процессе массового обслуживания; K — число каналов обслуживания; λ — интенсивность потока для изолированных требований; μ — интенсивность обслуживания требований; n — количество требований, находящихся на обслуживании или ожидающих обслуживания. Рассмотрим простейшие пуассоновские входящие потоки требований и процессы их обслуживания, т.е. потоки, обладающие свойствами ординарности и отсутствия последействия. Ординарность потока означает, что вероятность того, что на малый промежуток времени Δt , примыкающий к моменту времени t , попадет больше одного события, пренебрежительно мала по сравнению с вероятностью того, что на этот же интервал времени попадет ровно одно событие:

$$P_1(t, \Delta t) \geq P_{>1}(t, \Delta t).$$

Отсутствие последействия означает, что для любых двух непересекающихся интервалов времени τ_1 и τ_2 число событий, попадающих на один из них, не зависит от того, сколько событий попало на другой, то есть

$$P(x_2 = m_2 / x_1 = m_1) = P(x_2 = m_2), \quad (m_1 = 0, 1, 2, \dots; m_2 = 0, 1, 2, \dots),$$

где x_1, x_2 — соответственно случайное число событий, поступивших на интервале времени τ_1 и τ_2 .

Для пуассоновского, например, входящего потока требований с интенсивностью λ , вероятность поступления в систему m заявок в течение некоторого времени t равна

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} e^{-\lambda \tau},$$

а математическое ожидание количества событий в таком потоке на интервале $\overline{0, \tau}$ равно $M_\tau[m] = \lambda t$, то есть в единицу времени $M_\tau[m] = \lambda$.

Случайная величина времени между событиями в таком потоке событий распределена экспоненциально. При этом для исследуемого случая поток требований на обслуживание будет пуассоновским с изменяющейся дискретным образом интенсивностью.

Применительно к рассматриваемому случаю используем модель СМО, в которой возможны изменения состояний $E_n \rightarrow E_{n+1}, E_n \rightarrow E_{n-1}$, если $n \geq 1$, $E_0 \rightarrow E_1$. Вероятности перехода $E_n \rightarrow E_{n+1}, \geq 0$; $E_n \rightarrow E_{n-1}, \geq 1$ в интервале времени $(t, t + dt)$ для системы, находящейся в состоянии E_n в момент времени t , соответственно равны $\lambda_n dt, \mu_n dt$. Вероятность же нескольких изменений состояний в интервале $(t, t - dt)$ — величина бесконечно малая по сравнению с длительностью этого интервала. Индексы n в параметрах λ_n, μ_n указывают на то, что они являются функциями числа требований в системе.

В общем случае дифференциальные уравнения состояния для такой замкнутой системы массового обслуживания имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_0(t) &= -m\lambda' P_0(t) + \frac{\mu}{S} P_1(t), \\ \frac{d}{dt} P_n(t) &= -\left[(m-n)\lambda' + n\frac{\mu}{S} \right] P_n(t) + (m-n+1)\lambda' P_{n-1}(t), \quad 1 \leq n \leq S, \\ \frac{d}{dt} P_n(t) &= -\left[(m-n)\lambda' + \mu \right] P_n(t) + (m-n+1)\lambda' P_{n-1}(t) + \mu P_{n+1}(t), \quad S \leq n \leq m, \\ \frac{d}{dt} P_m(t) &= -\mu P_m(t) + \lambda' P_{m-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

При любых λ' и μ существует установившийся режим, для которого уравнения (1) принимают вид:

$$\begin{aligned} m\lambda' P_0 &= \frac{\mu}{S} P_1, \\ \left[(m-n)\lambda' + \frac{n}{S}\mu \right] P_n &= (m-n+1)\lambda' P_{n-1} + (n+1)\frac{\mu}{S} P_{n+1}, \quad 1 \leq n \leq S, \\ \left[(m-n)\lambda' + \mu \right] P_n &= (m-n+1)\lambda' P_{n-1} + \mu P_{n+1}, \quad S \leq n \leq m, \\ \mu P_m &= \lambda' P_{m-1}, \end{aligned}$$

что позволяет определить числовые характеристики для оценки описываемого процесса.

В рассматриваемом случае ($S = 1$), то есть случай одного прибора обслуживания, эти характеристики определяются по следующим формулам:

— вероятность того, что в системе отсутствуют требования:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^m \frac{m!}{(m-n)!} \psi^n \right]^{-1};$$

— вероятность того, что в системе имеется n требований: $P_n = \frac{m! \psi'^n}{(m-n)!} P_0$;

— среднее число требований в буфере: $\bar{v} = m - \frac{1 + \psi'}{\psi'} (1 - P_0)$;

— среднее число требований в системе: $\bar{n} = m - \frac{(1 - P_0)}{\psi'}$;

— среднее время ожидания в накопителе: $\bar{\omega} = \left[\frac{m}{1 - P_0} - \frac{1 + \psi'}{\psi'} \right] \mu^{-1}$;

— средняя продолжительность пребывания в системе: $\bar{u} = \left[\frac{m}{1 - P_0} - \frac{1}{\psi'} \right] \mu^{-1}$;

— показатель эффективности использования системы: $\psi = (m - \bar{n}) \psi' = 1 - P_0$,

где $\psi' = \lambda' / \mu$ — коэффициент использования или загрузка системы.

Для рассматриваемой в работе системы требованиями является информация, полученная от АККОЦУ кораблей тактической группы, предназначенная для решения задачи целераспределения. Обслуживание требования заключается в решении задачи целераспределения с информацией, содержащейся в требовании.

Среди комплекса сложных научно-технических проблем, требующих решения при создании АККОЦУ как СОТС, важное место занимает проблема обеспечения высокой надежности системы. В [21] рассмотрена проблема выбора на ранних стадиях проектирования наилучшего по показателям надежности варианта технического облика комплекса и связанные с ней вопросы разработки методов, моделей и алгоритмов оценки показателей надежности комплекса, составные части которых имеют различные ТТХ и произвольные законы распределения времен безотказной работы и восстановления элементов. Обоснована целесообразность применения для анализа надежности комплекса моделей, разработанных с использованием полумарковских процессов, так как полученные на их основе аналитические соотношения и алгоритмы инвариантны к широким классам законов распределения $T_{\text{бр}}$ и $T_{\text{в}}$ подсистем и позволяют проводить анализ структурной надежности сложных систем при произвольных законах распределения указанных времен в условиях реальных данных об отказах и времени восстановления элементов. Использование для оценки показателей надежности АККОЦУ методов расчета, основанных на применении марковских случайных процессов, принятых в нормативно-технических документах по надежности, приводит к значительным погрешностям. Выполнен анализ характерных с точки зрения надежности особенностей структурно-функционального построения комплекса и основных задач надежности, возникающих при системном проектировании комплекса. Использование указанного подхода позволило получить на их основе соответствующие аналитические выражения для расчета показателей надежности (коэффициента готовности, наработки на отказ, среднего времени восстановления) структурно-сложных систем при произвольных законах распределения $T_{\text{бр}}$ и $T_{\text{в}}$ элементов [22, 23].

Разработаны методы и алгоритмы описания условий работоспособности системы, позволяющие формализовать с помощью алгебры логики и ориентиро-

ванных графов представление в ЭВМ структурной схемы надежности комплекса и проводить оперативное моделирование множеств переходов работоспособных и отказовых состояний системы, на основе которых синтезирован алгоритм вычисления показателей надежности сложных систем. Разработан алгоритм вычисления показателей надежности сложных систем методом оперативного моделирования состояний работоспособности системы с помощью кратчайших путей успешного функционирования. Достоинством этого алгоритма является то, что он использует оперативное моделирование состояний работоспособности без прямого перебора состояний и при вычислении показателей надежности исключает необходимость решения интегро-дифференциальных уравнений [23].

Аналогично алгоритму, использующему метод кратчайших путей успешного функционирования, разработан алгоритм вычисления показателей надежности системы и определения структурной важности элементов с помощью минимальных сечений отказов. Предложена полумарковская модель оценки показателей надежности многоканальных комплексов с учетом распределения функциональной нагрузки отказавших каналов на работоспособные, для которой разработан и программно реализован алгоритм вычисления показателей надежности в случае быстрого восстановления элементов системы.

Высокий уровень сложности АККОЦУ при сжатых сроках проектирования и малой степени автоматизации проектных работ приводит к тому, что проработке подвергается малое количество вариантов (1–3), а спроектированный комплекс получается неоптимальным, с низкими ТТХ. При использовании автоматизированного проектирования удается выбрать один из нескольких сотен вариантов, что значительно повышает качество проектируемых комплексов. Рассмотрена задача выбора оптимального по совокупности аддитивных P_k проектного варианта технического облика комплекса из множества вариантов, генерируемых формализованным способом. Предложен способ генерирования возможных вариантов технического облика комплекса, рассчитанный на начальные стадии проектирования. Суть этого способа состоит в следующем [19]. Автоматизированный корабельный комплекс обнаружения и целеуказания разбивается на подсистемы, обусловленные иерархической структурой комплекса. Каждый вариант комплекса образуется совокупностью различных вариантов входящих в него подсистем (модулей). Каждый вариант подсистемы соответствующего иерархического уровня определяется совокупностью его математической модели (алгоритма действия) и типом ее технической реализации. Для формирования возможных вариантов технического облика комплекса используются достоверные математические модели входящих в него подсистем, а также набор возможных (существующих или перспективных) типов их технической реализации.

Выбор оптимального проектного варианта технического облика рассматриваемого комплекса предполагает отсев неудовлетворительных вариантов и перебор по обобщенному критерию оставшегося узкого множества «лучших» вариантов переговорного множества. Исследования проводились на задаче проектирования конкретного комплекса. В качестве аддитивных P_k использованы масса, стоимость, надежность, габариты, энергопотребление.

Вследствие итерационного характера разработки основных проектных решений методы, модели и алгоритмы векторной оптимизации и расчета показателей надежности используются на протяжении нескольких стадий жизненного цикла системы.

АККОЦУ должны обладать также повышенной живучестью, под которой в данном рассматриваемом случае мы понимаем способность системы к определенной компенсации последствий нарушений и повреждений отдельных ее устройств (элементов), позволяющую системе продолжать выполнение основных функций при полной утрате или временном снижении некоторых второстепенных показателей (точности, быстродействия, объема обрабатываемой информации).

Роль и место полигонных испытаний при разработке АККОЦУ

Важной составной частью решения всей проблемы создания бортового АККОЦУ является проблема экспериментальной оценки ТТХ комплекса в полунатурных и полигонных условиях. Рассмотрены важнейшие особенности разрабатываемых комплексов как объектов испытаний, в наибольшей степени определяющие требования к экспериментально-испытательной базе полигонов [14, 15].

Выделим три группы задач, решаемых при проведении испытаний АККОЦУ: получение эмпирических данных, необходимых для проектирования конкретного образца аппаратуры; установление соответствия изделия проектным требованиям; определение предельного состояния изделия. Цели испытаний не постоянны и меняются на различных этапах проектирования, конструирования, изготовления и эксплуатации комплекса. Применяемые методы (виды) испытаний АККОЦУ удобно классифицировать, разделив их на две большие группы: физические испытания системы или ее макетов; испытания с применением моделей (смешанных, полунатурных).

Физические испытания АККОЦУ или ее макетов проводят в условиях воздействия естественных или создаваемых искусственно внешних факторов. Эти факторы формируются с помощью специальных методов и средств в лабораторных условиях или с помощью испытательных стендов (лабораторные и стендовые испытания). При лабораторных и стендовых испытаниях техника подвергается воздействию ограниченного числа нагрузок, и условия исследования ее характеристик не всегда соответствуют реальным. Поэтому результаты таких испытаний должны быть проверены и уточнены испытаниями комплекса в условиях ее эксплуатации и под воздействием окружающей среды.

Испытания в условиях воздействия естественных внешних факторов в зависимости от решаемых задач и методов их проведения подразделяют на натурные и полигонные. Натурные испытания АККОЦУ проводятся в условиях и при воздействиях, адекватных реальным условиям и воздействиям. Причем объектом испытаний является изготовленная техника без использования ее составных частей или моделей, а определяемые характеристики свойств объекта измеряются непосредственно.

Получение оцениваемых параметров АККОЦУ косвенно с помощью аналитических зависимостей при натурных испытаниях не допускается. Полигонные испытания системы проводятся на оборудованных полигонах с использованием

специальной испытательной аппаратуры и систем информационно-аналитического обеспечения экспериментов в условиях воздействия естественных климатических факторов. Под полигоном понимается специальная территория, оснащенная и оборудованная средствами и аппаратурой для отладки техники и проведения ее испытаний в условиях, приближенных к реальным условиям ее эксплуатации и применения по назначению.

Испытания системы с использованием моделей осуществляются путем математического и физического моделирования. Математическое моделирование заключается в использовании уравнений, связывающих выходные и входные параметры объекта испытаний. При физическом моделировании такая связь реализуется непосредственно в физической модели, которая способна имитировать изменения состояния первичного параметра объекта испытаний (процесс работы аппаратуры, внешнее воздействие и т.п.).

Применение математического и физического моделирования позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний реальной аппаратуры комплекса или ее макетов. Применение математического моделирования приводит к необходимости проведения значительного объема теоретических и экспериментальных исследований для определения соотношений, характеризующих математическую модель объекта. Физическое моделирование может осуществляться статистическими методами испытаний. Метод статистических испытаний физическим моделированием объекта предусматривает проведение экспериментов на реальных объектах или их электронных моделях. Методом статистических испытаний определяется вероятность появления некоторого случайного события.

Используемые виды испытаний АККОЦУ могут быть классифицированы по различным принципам: категории; назначению; уровню проведения; этапу разработки; испытаниям готовой продукции; условиям и месту проведения; продолжительности; виду и результату воздействия; определяемым характеристикам объекта. В рассматриваемой классификации полигонные испытания отнесены к группе испытаний, объединенных по признаку условий и места их проведения.

Автоматизированные корабельные комплексы обнаружения и целеуказания представляют собой сложные системы, в которых организационно, функционально и технически объединены разнородные корабельные и авиационные радиотехнические системы обнаружения и целеуказания, средства обработки и передачи информации, вследствие чего в практике полигонных испытаний встает проблема обеспечения единства испытаний всех основных подсистем и элементов комплекса, разработки научно-методического обеспечения испытаний, включающего теорию испытаний, методы обработки измерительной информации, формирование оптимальных структур полигонных ИВК, развитие опытно-теоретического метода получения достоверных оценок ТТХ комплекса по результатам полигонных испытаний, планирование эксперимента.

Следует отметить, что в условиях постоянного возрастания сложности и стоимости АККОЦУ и связанного с этим уменьшением количества испытаний при одновременном увеличении затрат на проведение испытаний, едва ли не единственным методом получения достаточно достоверных оценок ТТХ комплекса является опытно-теоретический метод [14].

Наличие в составе бортовых АККОЦУ подсистем с различными физическими принципами функционирования обусловили необходимость проведения комплекса уникальных натуральных и полунатурных испытаний по оценке помехозащищенности и электромагнитной совместимости (ЭМС).

Разработан метод оценки помехозащищенности, предусматривающий наряду с аналитическими оценками натурные эксперименты с использованием облета комплекса авиационными постановщиками помех и применение отдельных видов активных и пассивных помех, а также исследования в условиях воздействия комбинированных помех. Метод позволяет также с достаточной степенью достоверности оценивать помехозащищенность комплекса от воздействия пассивных помех, используя постановку пачек дипольных отражателей авиационными постановщиками помех, прикрывающих полеты групп или одиночных самолетов. Предложен метод исследования помехозащищенности РЛС, включающий аналитическую оценку помехоустойчивости следящих измерителей координат целей РЛС и рекомендации по проведению испытаний с привлечением наземных и авиационных постановщиков помех [24]. Результаты выполнения оценки помехозащищенности могут быть использованы при планировании помеховой обстановки при конкретных испытаниях комплекса с целью недопущения отказов РЛС.

Рассмотрен системный подход к комплексной оценке обеспечения электромагнитной совместимости АККОЦУ на стадии разработки и испытаний [12], а также опытно-теоретический метод анализа электромагнитной обстановки в группировке РЛК, используемой для выявления несовместных РЛС. Определена целевая функция РЛК, представляющая собой зависимость вероятности выполнения комплексом главной целевой задачи от вероятностей выполнения отдельных операций, обеспечивающих решение этой задачи. С помощью полученной функциональной зависимости можно учитывать воздействие на качество функционирования РЛК основных факторов, определяющих ЭМС комплекса. К ним относятся внешние условия функционирования РЛК, влияние электромагнитной обстановки, а также влияние структуры комплекса и качества функционирования отдельных РЛС на его эффективность при воздействии непреднамеренных радиопомех. С помощью указанной функциональной зависимости представляется возможным оценить качество организационных и технических мероприятий по обеспечению ЭМС, оптимизировать структуру и параметры РЛК в отношении электромагнитной совместимости.

Обеспечение электромагнитной совместимости при включении всей радиоэлектронной техники комплекса определяется степенью снижения качества его функционирования по отдельным показателям K_s при наличии непреднамеренных помех и в случае отсутствия помех соответственно. Электромагнитная совместимость считается обеспеченной при $K_s \geq K_{сгр}$. Для количественной оценки ЭМС предложено использовать следующие показатели: коэффициент снижения надежности K_n получения радиолокационной информации; коэффициент снижения точности K_σ измерения координатных параметров. Коэффициенты K_n и K_σ должны определяться независимо для каждого параметра. По результатам экспериментальных исследований характеристик РЛС оценивается их соответствие требованиям по электромагнитной совместимости, указанным в тактико-техническом за-

дании, а после вычисления значений K_n и K_σ определяется возможность работы каждой РЛС в составе комплекса. Предложенные показатели оценки электромагнитной совместимости, получаемые экспериментально методом полунатурных и натурных испытаний, могут быть использованы в качестве формальных показателей при выборе и обосновании режимов работы и оптимальной структуры комплекса.

Рассмотрены научные проблемы и методологические вопросы испытаний АККОЦУ. Обсуждены роль и место испытаний в общей системе экспериментальных исследований комплекса [14]. Выполнены классификация методов и видов испытаний комплекса и анализ технологических циклов полигонных и натурных испытаний комплекса. В рассматриваемой классификации [14] полигонные испытания отнесены к группе испытаний, объединенных по признаку условий и места их проведения. Приведена структура общей системы испытаний комплекса, охватывающая разработку и изготовление, предварительные и приемочные (государственные) испытания комплекса и его составных частей. Определено место полигонных испытаний опытных образцов АККОЦУ в системе испытаний радиолокационной техники. Указан требуемый состав испытательного оборудования, контрольно-испытательной аппаратуры, ИВК, моделирующих средств и решаемых ими задач. Определены инфраструктура и требования к экспериментально-испытательной базе полигона для проведения испытаний комплекса.

Даны рекомендации по использованию и комплексированию испытательного оборудования и измерительных средств полигонных измерительно-вычислительных комплексов [15, 16]. Предложена методология разработки оптимальной инфраструктуры полигонного измерительно-вычислительного комплекса для натурных испытаний АККОЦУ с выполнением требований по количеству одновременно измеряемых параметров и точности их определения, базирующаяся на разработанных частичной и полной моделях измерительно-вычислительных комплексов. Изложен подход к разработке частичных и полной моделей измерительно-вычислительного комплекса, с помощью которых можно оценить возможности полигонных измерительно-вычислительных комплексов до начала испытаний АККОЦУ. В структурной схеме полной имитационной модели дискретной системы сложного ИВК частичные модели с известным функциональным назначением определены в виде отдельных блоков. Основными особенностями полной модели измерительно-вычислительных комплексов являются функционирование всех частичных моделей в едином масштабе времени совместно с работой средств внешнетраекторных измерений, сопряжение модели с реальными средствами регистрации и накопления. Получены основные соотношения в виде стохастической системы конечно-разностных уравнений, представляющие собой математическую модель каждого параметрического канала следящего измерителя дальности.

Рассмотрена проблема обеспечения одновременного и скоординированного решения задач испытаний АККОЦУ в целом, а также входящих в состав комплекса подсистем. Показано, что корректно учесть влияние множества факторов путем математического и полунатурного моделирования в большинстве случаев невозможно. По этим причинам возрастает значение и удельный вес натурных и полигонных испытаний и, как следствие, возникает комплексная проблема научно-тех-

нического и теоретического обеспечения испытаний, не имеющая на сегодняшний день однозначного решения.

Показана целесообразность развертывания работ по комплексной автоматизации всего испытательного процесса, основой которой должно стать создание на базе существующих и новых средств и систем полигонных испытательных комплексов автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов, которые обеспечат: комплексирование информации, получаемой от радиотехнических, оптических, оптико-электронных средств траекторных измерений и телеметрии в реальном времени; автоматизацию процессов измерения, сбора, передачи, обработки, хранения информации, включая данные о текущей фоноцелевой и помеховой обстановке и других условиях проведения испытаний, и значительное сокращение времени получения потребителем результатов эксперимента; сокращение общего числа необходимых натуральных экспериментов за счет рационального управления потоками измерительной информации и повышения эффективности ее использования.

Определена структура полигона [15] для испытаний комплекса, стержнем развития экспериментально-испытательной базы которого должно стать опережающее по отношению к объектам испытаний развитие средств и систем обеспечения испытаний. Научно-методической основой всех работ по совершенствованию экспериментально-испытательной базы полигона должна стать теория обеспечения полигонных испытаний АККОЦУ, которая включает: единую методологию обеспечения испытаний, предусматривающую, в частности, разработку формализованных связей задач развития экспериментально-испытательной базы полигона с задачами испытаний и требованиями к качеству и эффективности испытываемых образцов комплекса; теоретические основы анализа, синтеза и оптимального проектирования полигонного ИВК и его основных подсистем, формирования оптимальных структур и геометрии измерительных систем, оценки их точностных характеристик; методы обработки измерительной информации, принципы и алгоритмы ее комплексирования и оптимальной фильтрации; методологию и методы планирования эксперимента [25]; методы аттестации средств обеспечения испытаний и измерительно-вычислительных комплексов; программное планирование работ по развитию экспериментально-испытательной базы полигона.

В результате выполненных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно классифицировать как новое достижение и развитие перспективного научного направления — теоретических основ разработки и полигонных испытаний сложных многофункциональных систем на основе широкого применения идей и методов системного подхода.

Полигонные испытания опытных образцов АККОЦУ в системе испытаний сложной техники

Сложность системы оказывает существенное влияние на этапность проведения ее испытаний. Причем цели и задачи испытаний меняются по мере прохождения изделием стадий его жизненного цикла. По мере видоизменения объекта испытаний меняются виды, исполнители и средства обеспечения испытаний. В представляемой общей системе испытаний комплекса полигонные испытания включают предварительные и приемочные испытания опытных образцов системы и их составных частей.

В процессе полигонных испытаний представляется возможность: проверить и подтвердить концепции создания системы данного профиля; оценить соответствие основных характеристик системы ТТЗ; определить пригодность системы к эксплуатации и возможность постановки на производство; выявить реальные возможности и границы применения системы по назначению; определить механизмы возможного взаимодействия аппаратуры системы с другой техникой; получить информацию, необходимую для формирования штатной структуры по обслуживанию системы; собрать данные, необходимые для определения путей повышения эффективности и возможной модификации данного образца комплекса. Применяемые на современных полигонах (испытательных базах) специальные средства измерений (внешнетраекторные, телеметрические и внутривантоновые) вместе с аппаратурой сбора, преобразования, передачи и обработки информации объединяются в измерительно-вычислительный комплекс.

Использование моделирования при испытаниях бортовых АККОЦУ

В ходе полигонных испытаний с помощью моделирования решаются задачи: выявления практических условий, в которых функционирование системы необходимо подтвердить натурными экспериментами; получения необходимого объема статистических данных, используемых для организации, планирования и проведения испытаний; определения и обоснования границ изменения исследуемых в процессе испытаний основных тактических характеристик системы; уточнения технических характеристик функциональных устройств системы и выявление их отклонений от значений, определяемых ТТЗ; оценки достижимости требуемых значений характеристик системы после внесения возможных конструктивных изменений при усовершенствовании аппаратуры и т.д.

Оценка основных характеристик аппаратуры системы выполняется на так называемых автономных моделях. В состав современных АККОЦУ входят ЭВМ (системы обработки информации, СОИ), решающие задачи управления, первичной и вторичной обработки информации. Необходимость проведения исследований по оценке технических решений, основных характеристик комплекса и проверке программ ЭВМ (СОИ) при работе в реальном времени требует комплексного моделирования. Комплексные модели включают математические модели отдельных функциональных устройств системы, а также программ, представляющих собой математическое обеспечение СОИ. По существу комплексное моделирование представляет собой дальнейшее развитие автономного моделирования, при котором производится приближение моделей к реальным объектам исследования, а процесса моделирования — к реальному физическому процессу.

Для выполнения требований необходимого сочетания оперативности и достоверности подготавливаемых для реальных экспериментов данных целесообразно применять математические модели и полунатурные моделирующие стенды (смешанные модели), в состав которых входят элементы аппаратуры АККОЦУ и ЭВМ.

Применение компьютерных имитационных моделирующих стендов для обработки бортовых АККОЦУ

К автоматизированным корабельным комплексам обнаружения и целеуказания, как системам реального времени, предъявляются жесткие требования к вре-

менным интервалам выполнения измерений (съема информации), их диагностики и обработки, выработке необходимой новой информации (управлению). К ним можно отнести, в частности, практически любые системы, содержащие в качестве измерительного средства РЛС. Их разработка, моделирование, проведение исследований, макетирование, создание опытных образцов, наладка производства серийных изделий, в которых задействованы большие коллективы исполнителей, требует больших затрат.

Качественные характеристики разрабатываемых АККОЦУ стоят в прямой зависимости от этих затрат. Профессиональность разработчиков системы определяется поиском уменьшения затрат не только без потери качества, но и с возможностью его повышения. Этот поиск привел к созданию компьютерных имитационных моделирующих стендов (КИМС) или компьютерных моделирующих комплексов [26, 27].

КИМС — это, по существу, система, в большей своей части дублирующая разрабатываемый и внедряемый образец объекта, среда функционирования для которого подменена аппаратно-программной моделью. Например, средой функционирования для КИМС РЛС является пространство координат математических моделей различных целей, пространство параметров математических моделей зондирующего и отраженного сигналов, различного рода шумов и помех. Оптимизация состава КИМС сводится к его компьютеризации. КИМС для отработки бортовой АККОЦУ представляет собой полунатурную модель «Внешняя обстановка – РЛС», в которой внешняя обстановка реализуется с помощью физико-математической модели, а РЛС представлена в натурном виде. Такая модель позволяет решать следующие задачи: оценить те ТТХ системы, которые невозможно оценить при натуральных испытаниях из-за сложности и дороговизны; значительно уменьшить затраты на натурные испытания системы путем их комбинации с испытаниями АККОЦУ с помощью КИМС.

Рассматриваемый КИМС является: средством ускорения работ по разработке, отладке, внедрению системы; средством отработки программно-алгоритмического обеспечения системы обработки информации; инструментарием повышения качественных характеристик АККОЦУ, инструментом сокращения материальных затрат.

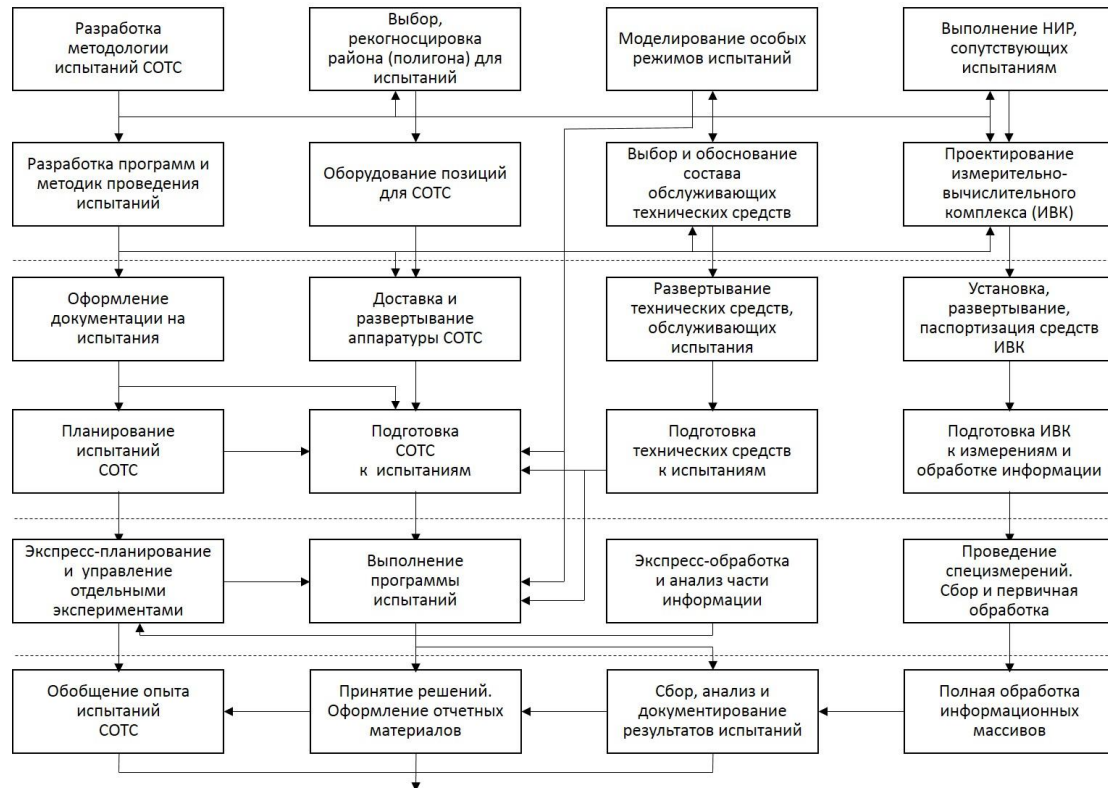
Организация испытаний АККОЦУ

Процесс проектирования, организации, подготовки и проведения полигонных испытаний АККОЦУ как сложной организационно-технической системы (СОТС) представим в виде технологического цикла (см. рисунок), выделив в нем следующие этапы.

1. Проектирование, организация, научно-методическое и математическое обеспечение испытаний.
2. Планирование испытаний, подготовка к ним элементов опытного образца системы, обслуживающих технических средств и ЭИБ.
3. Выполнение программы испытаний, анализ экспресс-информации.
4. Полная обработка и анализ результатов испытаний, принятие решений.

Этап проектирования, организации и научно-методического обеспечения полигонных испытаний опытного образца системы включает выполнение следующих основных видов работ: разработку научной методологии полигонных испы-

таний; выбор и рекогносцировку района (полигона) для проведения испытаний; оборудование (строительство) позиций для элементов системы; разработку программы и методик испытаний; моделирование основных режимов испытаний; проведение НИР по возможным проблемным вопросам предстоящих испытаний; проектирование ИВК, выбор технических средств, обеспечивающих испытания.



Технологический цикл подготовки и проведения испытаний СОРС

На этапе планирования и подготовки к испытаниям основными мероприятиями и видами работ являются: доставка на полигон, развертывание на позиции и наладка аппаратуры системы; развертывание и подготовка к работам технических средств, обеспечивающих испытания; установка, проверка функционирования, привязка, паспортизация средств ИВК и подготовка его к измерениям и обработке информации; планирование экспериментов и оформление документации на испытания; подготовка системы к испытаниям.

Основными видами работ, выполняемыми после проведения испытаний, являются: полная обработка массивов информации, полученной по результатам испытаний; сбор, анализ и документирование результатов испытаний; принятие решений (о готовности системы к приемочным испытаниям, доработке, поставке на эксплуатацию и производство и т.п.); обобщение опыта испытаний (формирование базы знаний накопленного опыта) с выработкой практических предложений по их совершенствованию или по модернизации испытываемого изделия.

Приведенный технологический цикл поэтапного проведения полигонных испытаний системы характеризуется разнородностью решаемых задач, неоднород-

ностью информационных потоков, сложной и многоуровневой структурой построения. В представляемой общей системе испытаний АККОЦУ как СОТС полигонные испытания включают предварительные и приемочные испытания опытных образцов системы и их составных частей (функциональных подсистем, модулей, блоков).

В процессе полигонных испытаний АККОЦУ представляется возможность: проверить и подтвердить концепции создания системы данного профиля; оценить соответствие основных характеристик системы требованиям ТТЗ; определить пригодность системы к эксплуатации и возможность постановки на производство; выявить реальные возможности и границы применения системы по назначению; определить механизмы возможного взаимодействия аппаратуры системы с другой техникой; получить информацию, необходимую для формирования штатной структуры по обслуживанию системы; собрать данные, необходимые для определения путей повышения эффективности и возможной модификации данного образца комплекса.

Современные научно-исследовательские испытательные полигоны для испытаний АККОЦУ должны обладать достаточно сложной экспериментально-испытательной базой (ЭИБ). Наличие процесса управления ЭИБ является одним из основных условий ее существования и функционирования. Качественное решение задач управления возможно при применении автоматизированной системы управления испытаниями (АСУИ), которая должна обеспечивать: координацию всех видов работ полигона и элементов ЭИБ; централизованное управление процессами организации, подготовки и проведения испытаний; постановку задач управляемым объектам и принятие решений на выполнение работ, задержек испытаний и т.п.; выполнение оперативности управления; сбор, обработку и обобщение информации о техническом состоянии и готовности к испытаниям элементов ЭИБ и т.д. АСУИ должна объединить источники информации, средства автоматизации управления, управляемые объекты и управляющие органы.

Стратегия выбора оптимальных путей развития экспериментально-испытательной базы для испытаний бортовых АККОЦУ

Бортовые АККОЦУ, как объекты испытаний, представляют собой сложные системы, в которых функционально, организационно и технически объединены средства наблюдения, управляемые средства с автономными, радиокомандными или комбинированными системами управления, а также средства автоматизированной обработки, управления и связи. Вследствие этого в практике полигонных испытаний таких комплексов остро встает проблема обеспечения одновременного и скоординированного решения задач всех видов испытаний практически всех основных подсистем АККОЦУ, входящих в состав систем более высокого ранга.

Наличие в составе системы электронно-оптических, радиолокационных и радиотехнических подсистем на разнородных физических принципах функционирования, пространственно-распределенных информационно-вычислительных подсистем обуславливают необходимость проведения комплекса уникальных натуральных испытаний по оценке помехозащищенности и работоспособности испытываемого образца системы в условиях радиоэлектронного противодействия противника. Кроме того, существенное усложнение характерных задач испытаний взаимодействующих подсистем АККОЦУ, функционирующих во времени и про-

странстве, приводят к усложнению задач обеспечения отработки и испытаний системы в целом.

Выбор оптимальных путей развития ЭИБ полигонов даже на уровне концептуальных вопросов является трудно решаемой задачей как в теории, так и на практике. Причем требуется найти рациональное решение в условиях разнообразия испытываемых на полигоне образцов АККОЦУ, что предопределяет необходимость оснащения полигонов разнообразными средствами обеспечения испытаний, объединенных в сложные автоматизированные измерительно-вычислительные системы и комплексы с учетом специфики и сложившихся структур ЭИБ полигонов.

Одна из основных трудностей состоит в том, что не только существующие, но и разрабатываемые промышленностью новейшие средства и системы для полигонных испытательных комплексов не удовлетворяют в полной мере требованиям задач автоматизации испытаний перспективных АККОЦУ по ТТХ, уровню автоматизации, составу измеряемых параметров, темпу измерений, средствам регистрации информации. Наблюдается заметное отставание возможностей экспериментально-испытательной базы полигонов в практической реализации испытательного процесса от современного уровня развития методологии и теории испытаний.

В связи с изложенным, стратегия (концепция) развития ЭИБ полигонов с позиций системного подхода, при котором обоснование и разработка путей развития ЭИБ полигонов рассматривается как сложный итерационный процесс поиска рациональных решений комплексной оптимизационной задачи, охватывающей направления исследований, объединенных общей целью — повышением эффективности обеспечения отработки и испытаний системы.

Формальная оптимизационная модель M , соответствующая этой задаче, включает следующие объекты:

— множество требований S к экспериментально-испытательной базе полигонов, сформулированных на основе анализа концепции испытаний комплекса

$$S = \langle \{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_m\}, \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_m\} \rangle,$$

где $F_i \subseteq F$ — множество задач испытаний i -го образца комплекса; $T_i \subseteq T$ — множество требуемых сроков готовности экспериментально-испытательной базы полигонов к испытаниям i -го образца системы;

— множество решений $X = \{X_k | k \in K\}$ по формированию концепций (путей) развития экспериментально-испытательной базы полигонов, каждому из которых соответствует некоторый ожидаемый результат ее реализации y_k , т.е.

$$x_k \approx y_k = \langle \Phi_k, \hat{T}_k, k \in K \rangle,$$

где $\Phi_k = \{t_j | j \in \mathfrak{Z}\}$ — множество решаемых задач испытаний в случае k -й реализации; $F \subseteq \Phi$ и $\Phi_k \in \Phi$; $\hat{T}_k = \{\hat{t}_j | j \in \mathfrak{Z}\}$ — множество ожидаемых сроков готовнос-

ти ЭИБ полигонов к обеспечению соответствующих испытаний; $\mathfrak{I} = \{1, 2, \dots, n\}$; в общем случае $n \geq m$;

— множество показателей качеств решений $V(X_k)$, из которых конкретизируем только первый по степени важности V_{1k} — затраты на реализацию k -го решения, имея в виду, что в общем случае модель соответствует многокритериальной задаче.

Требуется найти такое рациональное решение $x \in \hat{X}^*$ из множества допустимых решений

$$\hat{X} = \left\{ \hat{X}_{k \in K} \mid \forall \hat{X}_k \rightarrow F \setminus (F \cap \Phi_k) \leftrightarrow \Phi \wedge \left(\forall \hat{t}_l \left(\hat{t}_l \in (T \cap \hat{T}_k) \rightarrow \hat{t}_l \leq t_l \right) \right) \right\},$$

которые обращают в минимум обобщенный показатель эффективности обеспечения отработки и испытаний образца комплекса на рассматриваемую перспективу:

$$V \left(X^* \right) = a_1 V_1^* + a_2 V_2^* + \dots + a_r V_r^*,$$

где a_1, a_2, \dots, a_r — удельные веса частных показателей, определяемые на практике в рамках эвристических методов выбора решений.

Эта задача может быть решена только на основе методологии анализа и синтеза СОТС с использованием системного подхода.

Выводы

Выполнены исследования сущности системного подхода к проектированию комплекса, рассмотрены задачи его реализации при разработке и полигонных (натурных) испытаниях. Сущность системного подхода состоит во взаимосвязанном, комплексном изучении сложных объектов как целостных систем с определенными системными целями и согласовании целей системы и ее частей и подсистем в процессе функционирования.

Использование системного подхода при проектировании таких комплексов как СОТС состоит в выделении и представлении некоторой совокупности объектов и связей между ними в виде системы, в правильном понимании происходящих в них явлений, взаимодействий, умении выделить и поставить первоочередную (главную) группу задач.

Для придания процессу создания перспективного комплекса правильного направления развития заказчику и разработчику необходимо решить многие организационные вопросы

1. Додонов А.Г., Путьтин В.Г. Буточнов А.Н., Козлов Н.С., Юзефович В.В. Организация структуры системы обработки информации и управления. *Математические машины и системы*. 2014. № 4. С. 18–34.

2. Ракетные катера, проект 1241.1, 1241.1РЭ «Молния». URL: http://www.warships.ru/Russia/Fighting_Ships/Missile_Boats/1241.html

3. Титанит (радиотехническая комплексная система) — WikiVisually. URL: [http://wikivisually.com/lang-ru/wiki/Титанит_\(радиотехническая_комплексная_система\)](http://wikivisually.com/lang-ru/wiki/Титанит_(радиотехническая_комплексная_система))
4. Многофункциональный радиолокационный комплекс МФ РЛК «Заслон». URL: <http://www.zaslon.com/ru/node/55>
5. Карцев Р. Многофункциональная РЛС морского базирования ПРО США. *Зарубежное военное обозрение*. 2010. № 2. С. 61–65. URL: http://pentagonus.ru/publ/mnogofunkcionalnaja_rls_morskogo_bazirovanija_pro_ssha/31-1-0-1697
6. Иджис (система ПРО). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Иджис_\(БИУС\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Иджис_(БИУС))
7. МФИ РЛС для кораблей малого и среднего водоизмещения. URL: <https://concern-agat.ru/produktsiya/radiolokatsiya/mfi-rls-dlya-korablej-malogo-i-srednego-vodoizmeshcheniya.html>
8. Система обработки радиолокационной информации «Пойма-Э» URL: <https://concern-agat.ru/produktsiya/radiolokatsiya/sistema-obrabotki-radiolokatsionnoj-informatsii-pojma-e.html>
9. Радиолокационные станции «Подберезовик-Э», «Подберезовик-ЭТ1» и «Подберезовик-ЭТ22». URL: http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vmf/rls_podberezovik.html
10. Корабельный радиолокационный комплекс обнаружения и целеуказания «минерал-МЭ». URL: <http://armsdata.net/russia/0578.html>
11. Корабельная радиолокационная станция обнаружения воздушных и надводных целей МР-352. URL: http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vmf/rls_mr-352.html
12. Кучеров А.С., Путятин В.Г. Частичные и полная модели измерительно-вычислительного комплекса. *Электронное моделирование*. 1991. Т. 13. № 3. С. 36–40.
13. Кучеров А.С., Путятин В.Г., Сердюк В.Г. Измерительно-вычислительный комплекс для натуральных экспериментов: учеб. пособ. Киев: КВИРТУ ПВО, 1992. 302 с.
14. Путятин В.Г., Валетчик В.А., Додонов В.А. Системный подход к проектированию автоматизированных систем обработки информации и управления. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2007. Т. 9. № 1. С. 56–72.
15. Иванов В.А., Путятин В.Г. Оценка обеспечения электромагнитной совместимости в задачах разработки и испытаний радиолокационных комплексов. *Электронное моделирование*. 1993. Т. 15. № 2. С. 86–89.
16. Дубас В.Н., Иванов В.А., Путятин В.Г. Полигонные испытания радиолокационных станций слежения на стадии их разработки. АН Украины. Киев: Ин-т новых физич. прикладных проблем, 1993. 132 с.
17. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Построение информационно-аналитической системы научно-исследовательского испытательного полигона. *Управляющие системы и машины*. 2006. № 4. С. 3–14.
18. Додонов В.А. Методология системного проектирования и разработки автоматизированных систем обработки информации и управления. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2007. Т. 9. № 4. С. 91–106.
19. Путятин В.Г. Выбор рационального варианта технической реализации сложной организационно-технической системы в условиях многокритериальности. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2015. Т. 17. № 4. С. 71–92.
20. Путятин В.Г., Валетчик В.А., Додонов А.Г. Оценка живучести противоборствующих информационно-управляющих систем. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2002. Т. 4. № 3. С. 104–112.

21. Зинюк М.И., Путятин В.Г., Шульга В.С. Расчет показателей надежности информационно-вычислительных систем при произвольном законе распределения времен безотказной работы. *Автоматика*. 1986. № 4. С. 49–52.
22. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Оценка показателей надежности информационно-управляющих систем с помощью кратчайших путей успешного функционирования. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2003. Т. 5. № 1. С.107–118.
23. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Модели и алгоритмы анализа структурной надежности сложных многофункциональных организационно-технических систем. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2015. Т. 17. № 1. С. 46–67.
24. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Оценка помехозащищенности РЛС тракторных измерений. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2003. Т. 5. № 4. С. 64–71.
25. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Планирование расхода летных ресурсов при натурных испытаниях радиолокационных комплексов. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2003. Т. 5. № 2. С. 3–9.
26. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Компьютерное моделирование системы управления мобильным авиационным комплексом. *Математические машины и системы*. 2014. № 4. С. 156–170.
27. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Куценко С.А., Низиенко Б.И., Юрасов А.А., Додонов Е.А. Компьютерное моделирование системы организационного управления авиационным комплексом. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2014. Т. 16. № 3. С. 25–44.

Поступила в редакцию 05.07.2017