

# КОРАБЕЛЬНЫЕ АСУ: МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СРЕДСТВ И КОМПОНЕНТОВ

УДК 623.618

А.В. Царевский

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ КОРАБЕЛЬНЫХ АСУ

*Царевский Андрей Валентинович, окончил физический факультет Казанского государственного университета. Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет публикации в области разработки общесистемного программного обеспечения для корабельных систем управления и автоматизации проектирования систем обмена информацией. [e-mail: charevsk@mail.ru].*

### Аннотация

В статье представлены результаты исследования аппаратно-программных комплексов обмена информацией (АПКОИ) корабельных АСУ с целью формализации постановки задач синтеза оптимальных проектных решений (ОПР). Представлена формализация общей задачи многокритериальной оптимизации проектных решений АПКОИ.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, синтез проектных решений, математические модели, надежность программных средств.

### Abstract

The article presents results of study of hardware and software systems for data exchange of shipborne C2 systems in order to formalize task statement of optimal design-solution synthesis. It also presents formalization of general task for multi-criterion optimization of design solutions of hardware and software systems for data exchange.

Key words: multi-criterion optimization, synthesis of design solutions, mathematical models, reliability of software.

### ВВЕДЕНИЕ

АПКОИ — специализированный аппаратно-программный комплекс (совокупность средств сопряжения — СС), предназначенный для обеспечения корабельных АСУ информацией. АПКОИ функционирует в автоматическом режиме и решает задачи обработки и обмена цифровой информацией с системами корабля (абонентами) в реальном масштабе времени (рис. 1). В состав каждого СС входит техническое средство (ТС) — специализированная ЭВМ и программные средства (ПС) — совокупность программ обработки информации от корабель-

ных систем. Взаимосвязь бортовой АПКОИ, корабельной АСУ и корабельных систем между собой показана на рисунке 2.

Режимы функционирования АПКОИ — централизованный (под управлением корабельной АСУ), автономный (автоматическое выполнение ряда функций). Работа в реальном масштабе времени с выдачей управляющей информации объектам — один из наиболее сложных режимов функционирования. От реального времени зависят как моменты решения задач, так и получаемые в результате данные. Реальное время — важнейший параметр, определяющий выходные воздействия и функциональную связь между

изменениями состояния реальных управляемых объектов и моделью их состояний в АПКОИ. Искажение значений времени нарушает эту временную связь и приводит к полному отказу системы взаимообмена. Длительность решения задач и скорость выдачи информации выдерживаются в соответствии с режимом работы и текущим состоянием абонентов и управляемых объектов. Обработка информации и выработка управляющих воздействий осуществляются АПКОИ с более высокой скоростью по отношению к скорости реального управляемого процесса. Это необходимо для того, чтобы имелся определенный запас времени для принятия решений и формирования управляющих воздействий.

### 1 Особенности взаимообмена информацией с абонентами

Обмен с абонентом ведется по каналу связи. Порядок организации обмена и необходимая аппаратура для его реализации образуют интерфейс, который характеризуется следующими показателями: наличием резервных линий связи; временем организации связи и временем передачи единицы объема информации; надежностью работы аппаратуры; достоверностью организации связи и достоверностью передачи данных; типом подключения к АПКОИ. Канал связи — это интерфейс с программным обеспечением обмена, позволяющий осуществлять обмен информацией в цифровом виде. Для каждого абонента выделяется свой канал связи с АПКОИ.

Все абоненты делятся на три категории. К пер-

вой категории относятся «активные» абоненты, прием и выдачу информации от которых регламентирует сам абонент, а время ответа на запрос для приема или выдачи строго ограничено. Ко второй категории относятся «пассивные» абоненты, у которых режим обмена регламентирует АПКОИ. К третьей категории относятся абоненты, которые сочетают в себе первые две категории. Например, по приему информации являются «активными», а по выдаче — «пассивными».

При наличии в системе «пассивных» абонентов временная диаграмма работы АПКОИ получается детерминированной. Такая временная диаграмма работы реализуется наиболее рационально и с минимальными затратами на разработку как ТС, так и ПС. С другой стороны, обмен с «пассивным» абонентом требует более сложную организацию обмена, следовательно, более сложные ПС обмена.

Сложность заключается в том, что АПКОИ берет на себя функции управления каналом (контроль канала, установка соединения, прием-передача информации, управление резервированием и т. п.). Принцип связи в этом случае либо периодический с заданной частотой, либо асинхронный, когда время начала обмена не регламентировано и определяется появлением в АПКОИ информации, необходимой для передачи абоненту, или необходимостью запроса информации у абонента.

Наличие «активных» абонентов в системе приводит к необходимости анализировать возможность совпадения моментов обмена инфор-

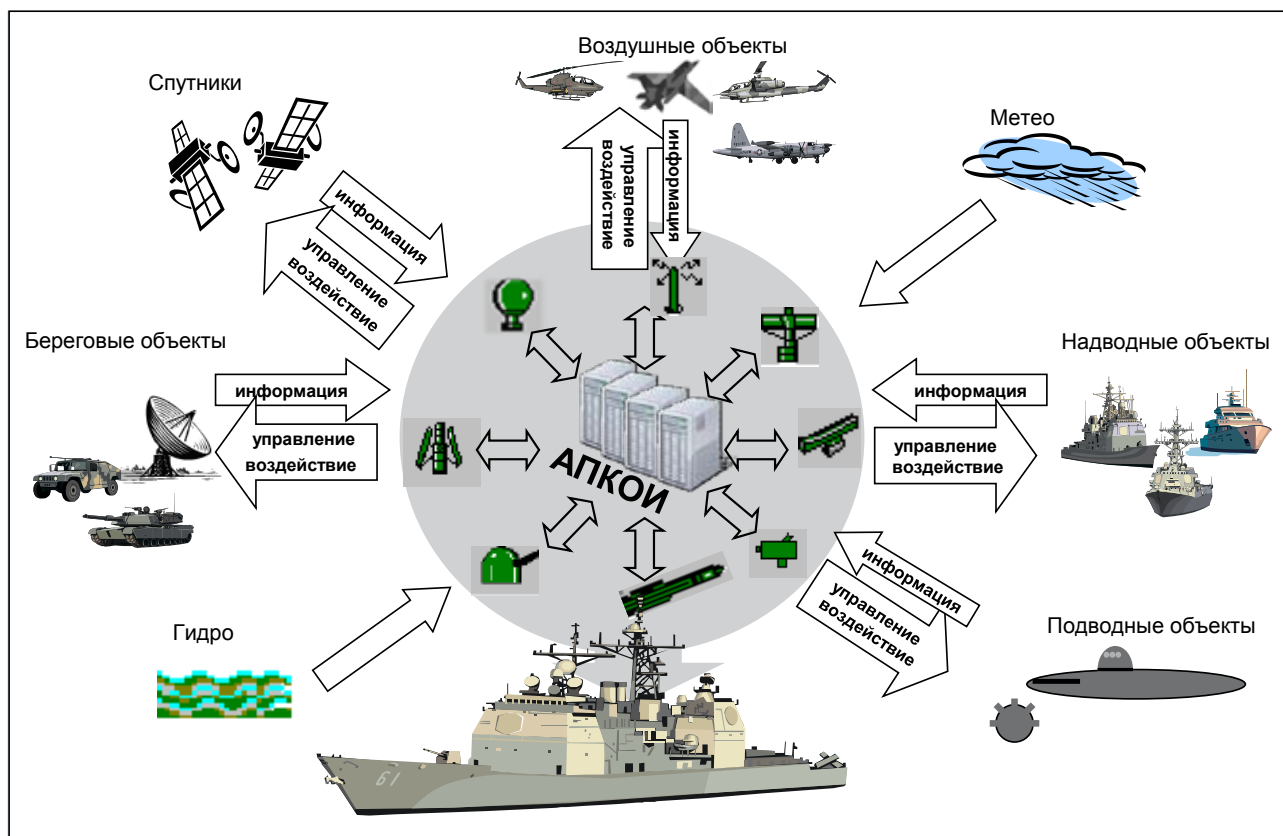


Рис. 1. Назначение АПКОИ

мацией у абонентов, что в свою очередь требует разработки более сложных ПС обработки. С другой стороны, АПКОИ выступает в роли «пассивного слушателя» канала, что уменьшает сложность ПС обмена. Принцип связи с «активными» абонентами определяет сам абонент. Сложность обмена заключается в том, что необходимо принять или выдать информацию тогда, когда этого требует абонент. Для этого необходимы дополнительные вычислительные ресурсы СС. Современные АПКОИ для корабельных АСУ работают совместно с активными и пассивными абонентами.

Работа абонентов не синхронизирована друг с другом. Каждый абонент работает по своему собственному расписанию. Расписание обмена определяется для «активных» абонентов самим абонентом, для «пассивных» абонентов — АПКОИ. Поэтому функционирование АПКОИ — это асинхронный процесс обмена и обработки информации в реальном масштабе времени, что в свою очередь требует правильного выбора вычислительных ресурсов системы.

С категорией абонента связана требуемая надежность обработки информации в АПКОИ. Информация «активных» абонентов требует самую высокую надежность обработки. У таких абонентов, как правило, построение алгоритма обмена направлено на достижение высокой надежности доставки и обработки информации, что несомненно требует дополнительных затрат на достижение требуемой надежности как со стороны ТС, так и со стороны ПС. К таким абонентам относятся наиболее жизненно важные корабельные системы; системы, находящиеся

под управлением корабельной АСУ; и системы, требующие мало времени на выработку управляющих воздействий.

Информация «пассивных» абонентов требует самую малую надежность обработки. Надежность доставки и обработки информации не столь критична. К таким абонентам относятся корабельные системы, которые не управляются корабельной АСУ, обмен с ними ведется в основном посредством справочной информации.

Информация «активно-пассивных» абонентов требует среднюю надежность обработки. К таким абонентам относятся корабельные системы, которые обмениваются информацией, не являющейся оперативной и не требующей срочной обработки. Как правило, это информация долгосрочного планирования.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ АПКОИ

Параметры информации от абонентов (частота поступления; объем поступающих данных в единицу времени; требуемая надежность обработки и т. д.) являются основными исходными данными для проектирования АПКОИ. Объем принимаемой и выдаваемой абонентом информации строго ограничен. Характеристики ПС и необходимые вычислительные ресурсы ТС определяются исходя из параметров информации от обслуживаемых абонентов. Информация абонентов характеризуется количеством параметров, с помощью которых описываются состояние и результаты работы абонента, регулярностью поступления, достоверностью параметров, точностью определения параметров. Информация абонента обрабатывается только

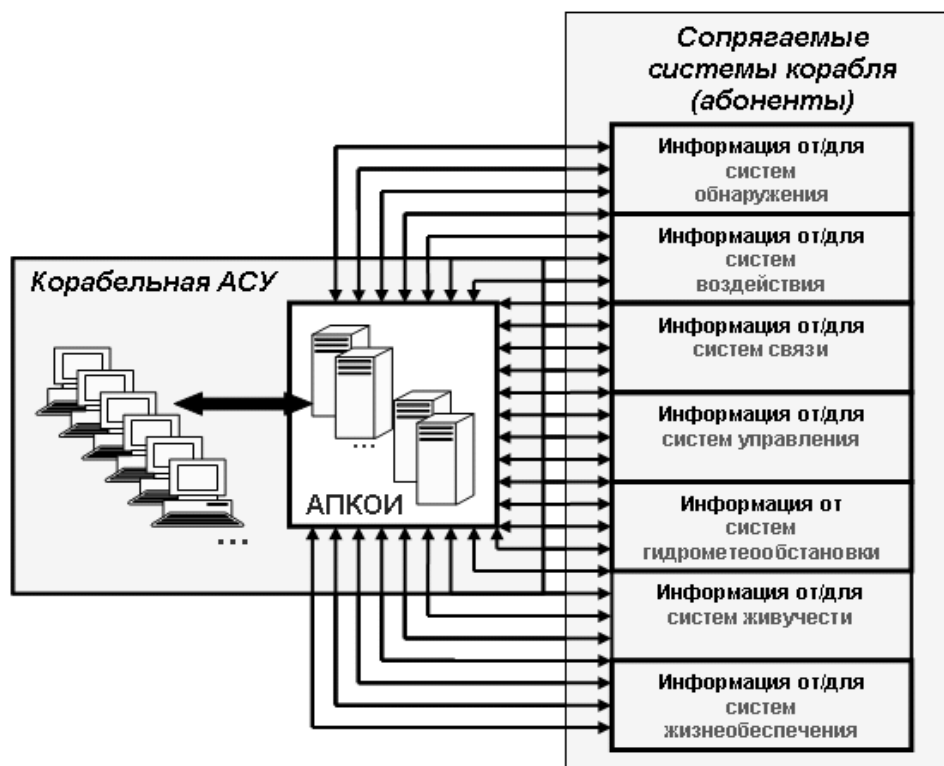


Рис. 2. Место АПКОИ среди корабельных систем

на конкретном СС, то есть разбивка ее на части для обработки на нескольких СС не практикуется. Скорость поступления информации по каналу различна для различных абонентов, так как различна физическая реализация каналов. Обмен с любым абонентом происходит уникальными для каждого абонента формализованными пакетами информации (формулярами). Одинаковый объем информации от разных абонентов принимается за разный промежуток времени. Обработка информации начинается только при полностью принятом формуляре, объем которого определяется спецификой каждого абонента. Скорость поступления информации по каналу не влияет на требуемую производительность ТС.

**Частота поступления** формуляров определяет интервал времени, в течение которого должен быть обязательно обработан поступивший формуляр. Но в системах реального времени на время обработки информации накладываются жесткие ограничения (обработка должна проводиться за время, меньшее, чем темп поступления формуляра), что в основном и определяет производительность ТС. Эти ограничения зависят от интервала времени, в течение которого в АСУ должно быть принято управляющее решение по результатам обработки поступившей информации.

**Объем поступающих данных в единицу времени** от абонента определяет производительность ТС. Минимальная производительность ТС ( $\mu$ ) для обработки формуляра объемом  $\Phi$  (Мбайт) и частотой поступления  $H$  (Гц) будет  $\mu = v = \Phi \cdot H$ , где  $v$  – объем данных, поступающих на обработку в единицу времени. Если формуляры требуется обработать за время в  $\sigma$  раз меньшее, чем темп его поступления  $T = 1/H$ , то  $\mu = \sigma \cdot v$ . Коэффициент  $\sigma \geq 1$  подбирается исходя из практики создания АПКОИ. Требуемая производительность (Мбайт/с) для обработки информации от  $m$ -го количества абонентов запишется в

$$\mu = \sigma \cdot \sum_{j=1}^m v_{a_j}$$

где  $v_{a_j}$  – объем данных, поступающих от  $j$ -го абонента в единицу времени (Мбайт/с).

Пример: для формуляра с  $\Phi = 0.005$  Мбайт и  $H = 6$  Гц параметр  $v_a = 0.03$  Мбайт/с, а требуемая производительность ТС, например, при  $\sigma = 100$  будет  $\mu = 3$  Мбайт/с. Реальная производительность ТС определяется тестами, которые включают применяемые алгоритмы (А) обработки данных.

**Надежность обработки** информации на средствах сопряжения АПКОИ включает две составляющие: надежность ТС и надежность ПС, которые в общем случае связаны некоторым со-

отношением  $p = f(P_{ПС}, P_{ТС})$ , отражающим взаимосвязь и взаимовлияние отказов ТС и ПС.

По определению, установленному в ГОСТ 27.002-89, надежность ТС – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность является внутренним свойством системы, заложенным при ее создании и проявляющимся во времени при функционировании и эксплуатации.

По определению, установленному в ГОСТ 28806-90, надежность ПС – совокупность свойств, характеризующая способность программного средства сохранять заданный уровень пригодности в заданных условиях в течение заданного интервала времени. Согласно ГОСТ 28195-99 одним из оценочных элементов надежности ПС является вероятность безотказной работы  $P_{ПС} = 1 - Q/N$ , где  $N$  – число экспериментов,  $Q$  – число зарегистрированных отказов. Надежность ТС определяется в основном двумя факторами: надежностью компонент и дефектами в конструкции, допущенными при проектировании или изготовлении. Надежность ПС определяется этими же факторами, однако доминирующими являются дефекты и ошибки проектирования, так как физическое хранение ПС характеризуется очень высокой надежностью. Программа любой сложности и назначения при строго фиксированных исходных данных и абсолютно надежной аппаратуре исполняется по однозначно определенному маршруту и дает на выходе строго определенный результат. Однако случайное изменение исходных данных и накопленной при обработке информации, а также множество условных переходов в программе создают огромное число различных маршрутов исполнения сложных ПС. Источниками ненадежности являются непроверенные сочетания исходных данных, при которых функционирующие ПС дают неверные результаты или отказы. В результате ПС не соответствуют требованиям функциональной пригодности и работоспособности. Понятия и методы теории надежности ТС применимы к тем ПС, которые функционируют в реальном времени и непосредственно взаимодействуют с внешней средой [1].

Формализации показателей качества ПС, включая и надежность, посвящена группа нормативных документов: ISO/IEC 9126-1-4, ISO/IEC 14598-1-6, ISO/IEC 9126-1:2001, ГОСТ 28195-99, ГОСТ 28806-90, ГОСТ 27.003-90, ГОСТ 27.301-95, ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 27.310-95.

При оценке надежности аппаратно-программных комплексов исходят из того, что надежность ПС не является самостоятельным свойством, так как может проявиться только в процессе функ-

ционирования в составе аппаратно-программных средств. Поэтому используется подход, при котором надежность ПС оценивается по степени влияния на комплексные показатели надежности системы, имеющей в своем составе ТС и ПС. Отказы ТС и ПС являются взаимозависимыми событиями. Взаимозависимость может возникнуть по многим причинам, в том числе из-за влияния режимов применения, влияния отказов друг на друга. Вместе с тем, с целью декомпозиции возможно получение отдельных оценок показателей надежности ТС и ПС с последующим их объединением по схеме независимых событий [2]. Игнорирование взаимозависимости отказов приводит к оценке снизу для показателей надежности обработки на средствах сопряжения АПКОИ. Надежность обработки информации на одном СС (вероятность безотказной работы) можно представить как произведение двух независимых величин  $p = P_{ТС} \cdot P_{ПС}$ .

Надежность  $P_{ПС}$  – требуемая надежность на фазе реализации и сопровождения (рис. 3).

Надежность  $P_{ТС}$  – эксплуатационная надежность ТС на момент сдачи ТС в эксплуатацию (рис. 4). Такой подход обеспечивает оценку снизу надежности АПКОИ.

Оценка надежности ПС может быть проведена по ГОСТ 28195-99, ISO/IEC 14598-1:1999 или методами статистической оценки (модели Джелинского-Моранды, Липова, Сукурта и т. д. [2]).

При большом количестве вариантов обрабатываемых данных появление ошибок в ПС зависит от случая, состоящего в том, что на обработку поступает как раз тот набор информации, который и приводит к ошибке. Появление ошибки носит вероятностный характер.

Ошибки ПС являются функцией от текущей входной информации и текущего состояния системы. Как часть аппаратно-программных средств ПС имеют следующие особенности:

- ПС не подвержены износу, и в них практически отсутствуют ошибки производства;
- если обнаруженные в процессе отладки и опытной эксплуатации дефекты устраняются, а

новые не вносятся, то надежность ПС повышается [3] (рис. 3);

- надежность ПС в значительной степени зависит от используемой входной информации, так как от значения входного набора зависит траектория использования ПС;

- если при возникновении ошибок дефекты не устранять, то ошибки ПС носят систематический характер;

- надежность ПС зависит от области применения; при расширении или изменении области применения показатели надежности могут существенно изменяться без изменения самих ПС.

На рисунке 3 значения  $P_{ПС}$ ,  $T$  показывают момент сдачи в эксплуатацию ПС с надежностью функционирования  $P_{ПС}$ , не ниже требуемой.

Требуемый уровень надежности достигается применением соответствующей технологии разработки [4, 5, 6, 7]. При эксплуатации выявленные ошибки могут быть исправлены, что увеличивает надежность ПС.

Надежность ТС характеризуется следующим:

- со временем надежность уменьшается, так как ТС подвержены износу;

- сбои ТС определяются в основном случайными отказами под воздействием различных факторов;

- отказы ТС практически не зависят от обрабатываемой информации;

- затраты на надежность ТС целиком определяются выбором соответствующей конфигурации ТС.

Начальный этап функционирования ТС характеризуется высокой интенсивностью отказов, которая достаточно быстро снижается по мере выявления и устранения в процессе отладки дефектных элементов. На рисунке 4 этот этап показан участком с возрастающей кривой [3].

Второй этап функционирования ТС характеризуется относительно неизменной интенсивностью отказов. Этот этап является основным периодом службы ТС, когда отказы возникают случайно. Горизонтальная часть кривой соответствует периоду нормального функционирования. Здесь отказы подчиняются закону Пуассона, т. е.

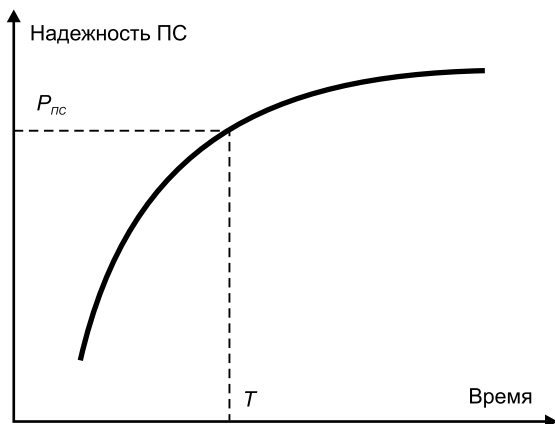


Рис. 3. Кривая изменения надежности ПС от времени разработки и эксплуатации

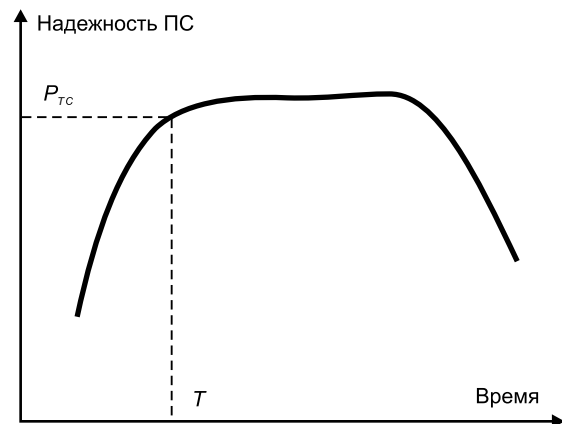


Рис. 4. Кривая изменения надежности ТС от времени функционирования

их можно считать случайными и независимыми. Такое изменение интенсивности отказов является желательным с точки зрения обеспечения надежности, так как оно позволяет прогнозировать надежность на основании данных ускоренных испытаний на срок службы. На рисунке 4 этот этап показан участком с горизонтальной кривой.

Третий этап — это этап износа, когда число отказов возникает в результате процессов износа. На рисунке 4 этот этап показан участком с убывающей кривой.

На рисунке 4 значениями  $P_{ТС}$   $T$  показан момент сдачи в эксплуатацию ТС с эксплуатационной надежностью работы  $P_{ТС}$ , не ниже требуемой. На рисунке 4 показан идеальный случай, когда начало эксплуатации соответствует требуемой эксплуатационной надежности. Реально момент сдачи в эксплуатацию может быть на участке с возрастающей кривой, и доводка надежности до требуемого значения идет во время эксплуатации.

Для ТС и ПС применим коэффициент готовности  $K_G = \frac{T_O}{T_O + T_B}$ , где  $T_O$  — среднее время

между отказами;  $T_B$  — среднее время восстановления.  $K_G$  — доля времени полезной работы на достаточно большом интервале времени, содержащем отказы и восстановления [1].

Такая характеристика ПС, как объем  $V_{ПС}$  влияет на размер необходимой оперативной памяти ТС  $V_{ОП}$ . На размер памяти влияет объем обрабатываемых данных  $V_{данные}$ , поступивших от абонента. Необходимым условием функционирования АПКОИ, как было сказано выше, является его работа в реальном масштабе времени. Это условие предъявляет жесткие требования к объему вычислений и обработке данных в единицу времени и приводит к необходимости хранить все ПС и данные в оперативной памяти. Скорость решения задач зависит от ряда параметров: производительности ТС; объема обрабатываемой информации; характеристик ПС; используемой операционной системы; организации вычислительного процесса и т. п. Проведенный анализ функционирования комплексов обработки показал, что наиболее эффективным (с точки зрения быстродействия и затрат на разработку) вариантом работы АПКОИ является вариант полной загрузки ПС и обрабатываемых данных в оперативную память  $V_{ОП} > V_{ПС} + V_{данные}$ . При таком варианте стоимость АПКОИ меньше (увеличение затрат на память намного ниже, чем на разработку дополнительных ПС), а эффективность работы выше.

Главными факторами, влияющими на производительность системы, являются тактовая частота работы процессора, скорость системной шины и скорость работы оперативной памяти. Далее по

важности идут параметры накопителей на жестких дисках и характеристики видеосистемы. Эти параметры образуют базовое множество, определяющее производительность ТС. В состав рассматриваемой АПКОИ не входят жесткие диски и видеосистемы. Поэтому производительность ТС АПКОИ полностью определяется тактовой частотой процессора, скоростью системной шины и частотой работы оперативной памяти.

### 3 Общая постановка задачи синтеза оптимальных проектных решений

Синтез проектных решений — это поиск количества СС, характеристик СС и разрабатываемых ПС, при которых обеспечивается выполнение с заданным качеством известного объема работ по приему и обработке информации от абонентов в реальном масштабе времени, при этом характеристики функционирования и/или создания АПКОИ принимают оптимальные значения.

Исходными данными для синтеза ОПР АПКОИ являются количество абонентов, объем формуляра каждого абонента, сложность обработки и надежность обработки информации абонентов, темп поступления информации от абонентов, зависимости между характеристиками ТС и ПС, неопределенность этих зависимостей и т. д.

В процессе поиска ОПР АПКОИ информация от абонентов некоторым образом и с учетом различных дополнительных условий распределяется по некоторому количеству СС, определяя характеристики функционирования и/или создания АПКОИ. В общем случае необходимые характеристики СС будут различны, так как на каждое СС будет распределена информация с различными числовыми значениями параметров.

Обозначения:

$X_p, \dots, X_k$  — характеристики АПКОИ (стоимость, производительность, надежность, память и т. п.);

$x_{1j}, \dots, x_{1m}, \dots, x_{nj}, \dots, x_{mn}$  — характеристики СС ( $x_{ij}$  —  $j$ -я характеристика  $i$ -го СС);

$x_{ij} = f_{ij}(\{x_{iz}\}_{z=1..n, z \neq j})$  — взаимовлияние характеристик СС;

$S$  — структура АПКОИ (количество СС, распределение ПС по СС и т. п.);

$A$  — алгоритм обработки информации от абонентов.

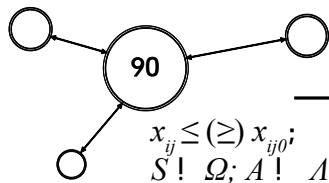
Постановка общей задачи многокритериальной оптимизации проектных решений АПКОИ: *Выявить взаимовлияние характеристик СС  $x_{ij}$  и выбрать ОПР АПКОИ  $R$  с характеристиками  $X_p$ , принимающими оптимум при заданных ограничениях.*

$$R = \{X_p, \dots, X_k\};$$

$$X_l = F_l(\{x_{ij}\}_{i=1..n, j=1..m}, S, A) \rightarrow opt;$$

$$x_{ij} = f_{ij}(\{x_{iz}\}_{z=1..n, z \neq j});$$

$$X_w \leq (\geq) X_{w0}, w = 1..k, w \neq l;$$



$$x_{ij} \leq (\geq) x_{ij0};$$

$$S! \Omega; A! L,$$

где  $X_{ij0}$  – ограничение на  $w$ -ю характеристику АПКОИ;

$x_{ij0}$  – ограничение на  $j$ -ю характеристику  $i$ -го СС;

$\Omega$  – множество допустимых вариантов АПКОИ;

$L$  – множество допустимых алгоритмов обработки информации.

Ограничения определяются при формулировании частных задач, т. е. когда известен перечень параметров информации, параметры выбора проекта АПКОИ, взаимовлияние характеристик СС и некоторые дополнительные условия для выбора (например, ограничение на количество СС, связанное с ограниченным местом на корабле).

К общим ограничениям относятся ограничения на правила распределения информации абонентов по СС.

**Ограничение О1.**  $n \leq K \leq m$  – количество СС не больше некоторой величины  $K$ , связанной с ограниченным местом на корабле, или не больше количества абонентов.

**Ограничение О2.**  $\sum_{i=1}^n y_{ij} \geq 1$  для всех

$j! [1, m]$  – информация каждого абонента распределена хотя бы на одно СС,  $Y = [y_{ij}]$  – матрица распределения информации абонентов по СС ( $y_{ij} = 1$ , если информация  $j$ -го абонента распределена на СС с номером  $i$ , в противном случае  $y_{ij} = 0$ ). Откуда следует, что

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \geq m.$$

Если  $\sum_{i=1}^n y_{ij} = 1$  – информация каждого абонента

распределена только на одно СС, тогда

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} = m.$$

**Ограничение О3.**  $\sum_{j=1}^m y_{sj} \geq 1$  для всех

$s! [1, n]$  – на СС распределена информация хотя бы одного абонента.

К ряду частных ограничений относятся следующие:

1. Ограничение на суммарную производительность технических средств.
2. Ограничение на производительность каждого технического средства.
3. Ограничение на надежность функционирования технических средств.
4. Ограничение на надежность программного обеспечения по обработке информации. Ограничение на оперативную память.
5. Ограничение на флеш-память.
6. Ограничение на время обработки каждого вида информации.
7. Ограничение на количество средств сопряжения.
8. Ограничение на стоимость каждого технического средства.
9. Ограничение на стоимость разработки программного обеспечения обработки информации.
10. Ограничение на количество абонентов, информация от которых обрабатывается на одном техническом средстве и др.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное обследование АПКОИ и формализация общей задачи синтеза ОПР АПКОИ позволяют вести дальнейшие исследования с целью автоматизации процесса поиска ОПР. Общая задача позволяет перейти к более частным задачам, где учитывается только часть характеристик, наиболее существенных при проектировании АПКОИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липаев В. В. Надежность программных средств / В. В. Липаев. – М. : СИНТЕГ, 1998.
2. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Г. Н. Черкесов. – М. : Питер, 2005.
3. Эдельман В. И. Надежность технических систем: экономическая оценка / В. И. Эдельман. – М. : Экономика, 1988.
4. Липаев В. В. Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты / В. В. Липаев. – М. : СИНТЕГ, 2001.
5. Липаев В. В. Методы обеспечения качества крупномасштабных программных средств / В. В. Липаев. – М. : СИНТЕГ, 2003.
6. Липаев В. В. Программная инженерия. Методологические основы / В. В. Липаев – М. : ГУ ВШЭ, ТЕИС, 2006.
7. Липаев В. В. Методология верификации и тестирования крупномасштабных программных средств / В. В. Липаев // Программирование. – 2003. – № 6. – С. 7–24.