

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕГО ЯДРА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**С.Ю. Желтов**

*Национальный научный центр ГосНИИ авиационных систем (ГосНИИАС)*  
Россия, 125319, Москва, ул. Викторенко, 7  
E-mail: [zh1@gosniias.ru](mailto:zh1@gosniias.ru)

**Б.Е. Федунов**

*Национальный научный центр ГосНИИ авиационных систем (ГосНИИАС)*  
Россия, 125319, Москва, ул. Викторенко, 7  
E-mail: [boris\\_fed@gosniias.ru](mailto:boris_fed@gosniias.ru)

**Ключевые слова:** глобальные уровни управления, ситуационная осведомленность экипажа, оперативное целеполагание, способ достижения оперативно назначенной цели

**Аннотация:** Системообразующее ядро летательного аппарата содержит два типа бортовых интеллектуальных систем: для пилотируемых летательных аппаратов а) интеллектуальную информационную систему ситуационной осведомленности экипажа, работающую на всех этапах полета (для беспилотных летательных аппаратов (БЛА) – интеллектуальную систему оперативного целеполагания) и б) бортовые оперативно советующие экспертные системы этапов полета для выделенных этапов полета (для БЛА – бортовые оперативно решающие экспертные системы этапов полета). Описывается функциональный облик таких интеллектуальных систем, предназначенных для решения так называемых тактических задач: оперативного целеполагания, выбора рационального способа достижения оперативно назначенной цели активизированного этапа полета.

## 1. Введение

Различаются пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (ЛА). В ЛА выделяются следующие составляющие:

- бортовые измерительные системы, поставляющие на борт текущую информацию о внешнем и внутрибортовом мире;
- бортовая цифровая вычислительная система (БЦВС), состоящая из сети бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ);
- информационно управляющее поле (ИУП) кабины (для пилотируемых ЛА);
- экипаж (для пилотируемых ЛА);
- бортовые исполнительные системы, обеспечивающие а) воздействие на внешний и внутрибортовой мир, б) перемещение ЛА.

При подготовке вылета группы летательных аппаратов (в частном случае одного летательного аппарата) перед группой ставится генеральная задача вылета (ГЗВ) и назначаются роли (ранги) ЛА в группе [1]. В процессе полета на любом ЛА группы в каждый текущий момент времени решаются для пилотируемых ЛА с помощью алгоритмов деятельности экипажа (АДЭ) и бортовых БЦВМ-алгоритмов; для беспилотных БЛА только с помощью бортовых БЦВМ-алгоритмов) задачи трех глобальных уровней

управления (ГЛУУ):

- задачи оперативного целеполагания (I ГЛУУ – первый глобальный уровень управления на ЛА),
- задачи определения рационального способа достижения оперативно поставленной цели (II ГЛУУ – глобальный уровень управления на ЛА),
- задачи реализации принятого способа достижения оперативно поставленной цели (III ГЛУУ – глобальный уровень управления).

Задач I ГЛУУ и II ГЛУУ решаются в системообразующего ядра ЛА. Их принято называть «тактическими задачами». Для их алгоритмического решения требуется разработка специальных бортовых интеллектуальных систем (БИС-Т/З).

На самолетах 4-го поколения задач I ГЛУУ и II ГЛУУ решаются только экипажем. Для самолетов этого поколения разрабатывались БЦВМ-алгоритмы главным образом для решения задач III ГЛУУ. При этом использовалась концептуальная модель авиационного комплекса «Эпизод». Эта модель содержит набор проблемных субситуаций (Пр/СС), выделенных для каждого этапа полета (типовой ситуации (ТС) полета). По каждой такой ПрС/С безотносительно к другим разрабатывается свое бортовое алгоритмическое и индикационное обеспечение (АиИО = АДЭ + БЦВМ-алгоритмы).

При использовании концептуальной модели «Эпизод» «тактические задачи» исчезают из поля зрения конструкторов бортового алгоритмического и индикационного обеспечения (АиИО).

Для создания БИС-Т/З потребовалось при проектировании бортового АиИО перейти к новой концептуальной модели ЛА – макромодели «Этап».

## 2. Концептуальная модель «Этап»

Концептуальная модель «Этап» для разработки БЦВМ-алгоритмов решения задач системообразующего ядра ЛА (задачи I ГЛУУ и II ГЛУУ) показана на рис. 1 (на примере самолета).

Модель «Этап» включает в себя: заданный Заказчиком набор ГЗВ, представление каждой ГЗВ через семантическую сеть ТС и представление каждой ТС через семантическую сеть ее ПрС/С [2]. В модели «Этап» задача I ГЛУУ интерпретируется как задача назначения текущей ТС полета, а задача II ГЛУУ – как задача построения семантической сети ПрС/С для этой назначенной ТС.

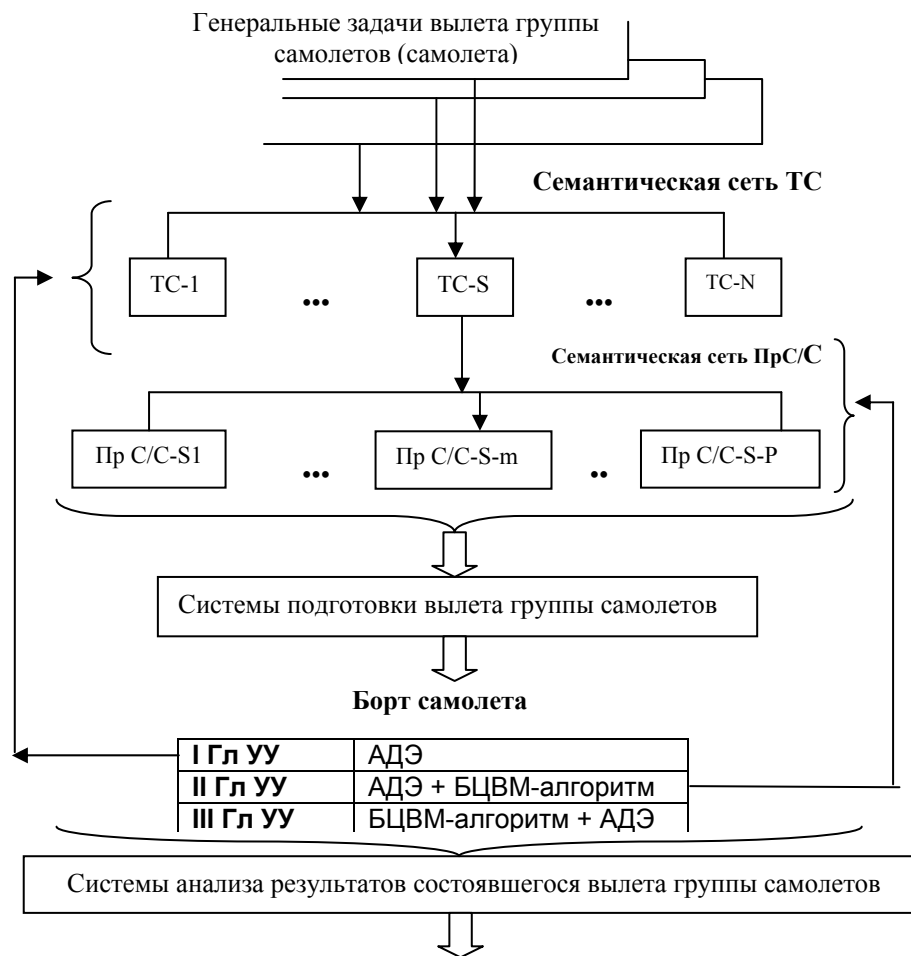


Рис. 1. Макромодель «Этап» для проектирования АИЮ системообразующего ядра.

### 3. Классификация и облик бортовых интеллектуальных систем решения задач ПГЛУУ и задач ГЛУУ (тактических задач)

Для решения тактических задач *на борту пилотируемого ЛА* размещаются интеллектуальные системы двух классов:

- интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ), работающая на всех этапах выполнения самолетами ГЗВ и обеспечивающая экипаж информационной моделью внешней и внутрибортовой обстановки для решения им задач ПГЛУУ – задачи оперативного целеполагания;
- бортовые оперативно советующие экспертные системы типовых ситуаций (БОСЭС ТС) полета (этапов полета) самолета, работающие каждая на своей ТС и рекомендуемые экипажу рационального способа достижения цели этой ТС (ПГЛУУ – глобальный уровень управления). Все рекомендации БОСЭС ТС поступают на реализацию только по сигналу экипажа.
- Для решения тактических задач *на борту беспилотных ЛА (БЛА)* размещаются интеллектуальные системы этих же классов:
- интеллектуальная система «Оперативного целеполагания» (ИС ОЦП), работающая на всех этапах выполнения БЛА поставленной ГЗВ; на БЛА она должна назначать текущий этап полета возможно с предварительной санкцией внешнего оператора (ПГЛУУ – глобальный уровень управления); и

- бортовые оперативно решающие экспертные системы типовых ситуаций (БОРЭС ТС) полета (этапов полета) БЛА, работающие каждая на своей ТС и вырабатывающие для автоматической реализации рациональный способ достижения цели этой ТС (ШГЛУУ – глобальный уровень управления).

### 3.1. Интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа»

Интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ) относится к классу систем, не предполагающих использования диалоговых процедур с экипажем [3]. Ее база знаний имеет одноуровневую семантическую структуру с набором продукционных правил, подключающих к выполнению в зависимости от текущей обстановки блоки БЦВМ-алгоритмов из следующего состава:

- выделение и ранжирование воздушных угроз;
- выделение и ранжирование наземных угроз;
- определение достаточности расходуемых ресурсов, необходимых для эффективного выполнения заданной ГЗВ;
- Значимые (для выполняемой генеральной задачи вылета) отказы бортовой аппаратуры.

Перед вылетом ЛА на его борт загружается априорная информация о предстоящем полете (ГЗВ, семантическая сеть ТС с выделением в ней штатных ТС, типы возможных угроз, ТС сохранения ЛА (ТС «Гомеостаз-ЛА») и его экипажа (ТС «Гомеостаз-экипаж») (в [15] американский физиолог Уолтер Кеннон (Walter B. Cannon) предложил этот термин как название для «координированных физиологических процессов, которые поддерживают большинство устойчивых состояний организма».

В процессе полета в систему ИИС СОЭ поступает текущая информация о внешней и внутрибортовой обстановки.

Выходная информация системы (с выделением и классификацией обнаруженных угроз) в виде информационной модели внешней и внутрибортовой обстановки предъявляется экипажу на индикаторах информационно управляющего поля (ИУП) кабины и через бортовые речевые информаторы.

Пример показа внешних наземных угроз на этапе полета «Маршрут» истребителя F-16 см. рис. 2 [4].

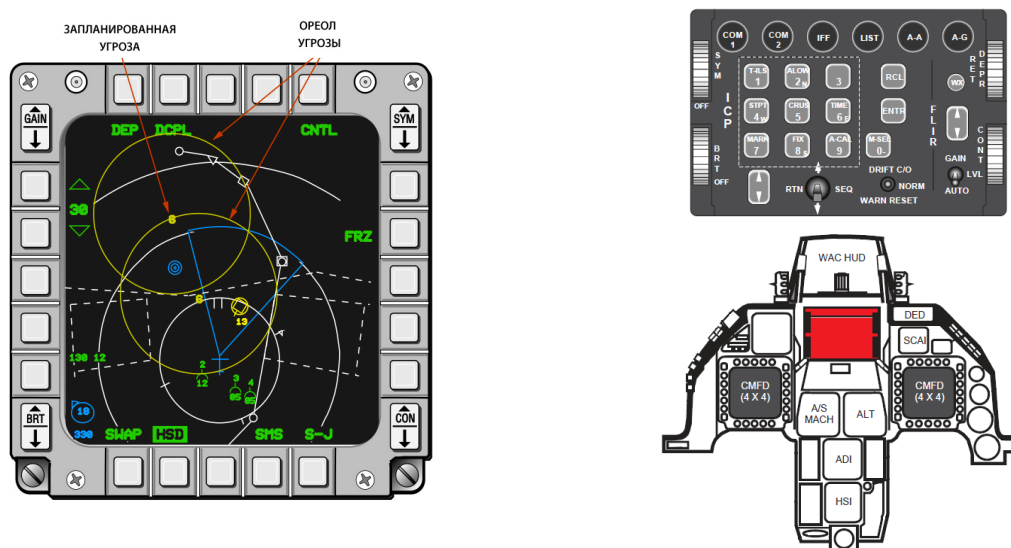


Рис. 2. Пример показа внешних угроз на этапе полета «Маршрут» истребителя F-16 (слева) и интегральная панель назначения ТС (справа).

Ориентируясь на развернутую на информационно управляющем поле (ИУП) кабины информационную модель внешней и внутрибортовой обстановки, экипаж принимает решения (с учетом выполняемой ГЗВ и ранга самолета в группе) о назначении/подтверждении текущего этапа полета (назначение ТС в терминах модели «Этап»). Как правило, это эвристические решения экипажа. Факт принятия такого решения экипажем подтверждается в БЦВС сигналом от соответствующей ручной операцией.

На рис. 2 на интегральной панели (правый верхний угол рис.2) показаны две таких кнопки назначения ТС: «Атака воздушной цели» (кнопка А-А) и атака наземной цели (кнопка А-Г).

На БЛА задачи оперативного целеполагания решаются интеллектуальной системой «Оперативное целеполагание» (ИС ОЦП), назначающей по текущей информации этап полета (ТС) и передающей сигнал в бортовую вычислительную систему БЛА для автоматического его исполнения.

Для этого перед вылетом БЛА на его борт загружается семантическая сеть ТС. На ней выделяется ветка штатных ТС (план полета). Наряду с этими ТС на борт заносится ТС, в которой решаются задачи сохранения целостности БЛА («Гомеостаз-БЛА»). Каждой ТС ставится в соответствие вектор условий ее наступления (ситуационный вектор  $SV(ТС\dots)$ ).

В ИС ОЦП формируется полное множество всех ситуационных векторов  $\{SV(ТС\dots)\}$ , в котором все вектора уникальны. При каждом поступлении в ИС ОЦП текущей информации ищется в ней реализовавшийся ситуационный вектор  $SV(ТС_{наст})$ . Он сравнивается с ситуационным вектором текущей (выполняемой) типовой ситуации  $SV(ТС_{выпол})$ .

При совпадении векторов подтверждается выполнение текущей ТС. При несовпадении векторов в ИС ОЦП запускается процедура определения приоритетной для исполнения ТС. В этой процедуре используется механизм вывода по прецеденту (см. ниже). В результате работы механизма вывода по прецеденту получаем ранжирование по приоритету рассматриваемых ТС. Выявленная приоритетная ТС передается на ПГЛУУ, для определения там способа ее разрешения.

*При наличии наземного/воздушного оператора, работающего с БЛА, предусматривается его оперативная санкция на реализацию решения ИС ОЦП. «Глубина» выработанного ИС ОЦП решения должна быть достаточна для автоматической его реализации даже без согласия оператора.*

### **3.2. Бортовые оперативно советуемые экспертные системы этапов полета самолета**

БОСЭС ТС – программная реализация в БЦВС интеллектуальной системы [5-9]. Ее основной функциональный блок – база знаний (БЗ), включающий в себя формализованные знания о ТС; задачи (проблемы), которые нужно решать в этой ТС/ТБС; способы решения этих задач (механизмы вывода). В БЗ используется структура модели «Этап» – рассматриваемая ТС представляется через семантическую сеть ее ПрС/С.

БОСЭС ТС обеспечивает нахождение способа решения проблем той ТС, для которой она разрабатывалась. Найденный БОСЭС ТС способ предъявляется экипажу на информационно управляющем поле кабины. Выработанный БОСЭС ТС способ содержит всю информацию, необходимую для организации его автоматической реализации на ПГЛУУ. Непосредственная автоматическая реализация способа наступает после поступления из ИУП сигнала от экипажа, разрешающего его полную или частичную реализацию.

БЗ имеет два иерархических уровня. Первый иерархический уровень БЗ – фор-

мальное представление семантической сети ПрС/С соответствующей ТС/ТБС. На этом уровне БЗ, используя текущую информацию во внешней и внутрибортовой обстановки, реализуется выбор (активизация) одной из ПрС/С этой сети. Механизм вывода – продукционные правила.

Второй иерархический уровень БЗ – математическая постановка (представление) задач каждой ПрС/С + адекватный способ (механизм) решения каждой из этих задач.

Для решения задач в каждой активизированной ПрС/С используются соответствующие ей механизмы вывода (алгоритмы решения задач) из нижеследующего перечня [10]:

а) продукционные правила (прямое заимствование знаний экспертов без выявления структуры его модели мира),

б) многокритериальный выбор альтернативы решения проблемы (по Т.Саати).

Для применения этого механизма задача, которую нужно решить, представляется:

- набором альтернатив ее решения  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ ,
- критериями предпочтения этих альтернатив  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ ,
- матрицами парных сравнений альтернатив  $A_i$ ,  $i = 1-n$ , по каждому критерию  $K_j$ ,  $j = 1-s$ , («s» штук матриц),
- матрицы парных сравнений критериев  $K_j$ ,  $j = 1-s$ , (одна матрица).

Пример использования этого механизма во фрагменте базы знаний БОСЭС ВГБ-В дан в [11];

в) вывод по прецеденту [10].

Эта простая формальная конструкция в базе знаний БОСЭС ТС требует от профессионала-эксперта по предметной области тщательного конструирования ситуационного вектора SV(проблема – прецеденты ее разрешения), описывающего решаемую проблему до глубины, позволяющей представлять использования каждого прецедента при различных реализациях проблемы. Как правило, координатами SV (проблема – прецеденты ее разрешения) являются лингвистические переменные с числом термов 5-7.

Формальные элементы механизма: SV(проблема – прецеденты ее разрешения), матрица знаний (предыдущий успешный опыт использования прецедента), текущее представление координат SV(проблема – прецеденты ее разрешения) количественными значениями, описывающими оперативно реализовавшуюся проблему заданного типа.

В результате работы механизма вывода по прецеденту получаем ранжирование по приоритету прецедентов, заложенных в базу знаний БОСЭС ТС. Прецедент с наивысшим приоритетом будет рекомендован для разрешения возникшей проблемы. Пример использования этого механизма во фрагменте базы знаний БОСЭС ВГБ-В дан в [11];

д) оперативное решение проблемы численными методами оптимизации. Этот механизм требует тщательной математической постановки задачи и выставляет повышенные требования к бортовым вычислительным ресурсам. Пример использования механизма можно найти в БОСЭС ДБВ1×1 [12].

Рекомендации БОСЭС ТС должны быть постоянно согласованными с активизированной моделью поведения экипажа на концептуальном и оперативном уровнях.

База знаний БОСЭС ТС относится к типу стационарных. Абсолютное время в ней реализуется: через событийную шкалу значимых событий, генерируемых математическими моделями (ММ) соответствующего типа; через смену правил выработки рекомендаций при смене ПрС/С; через постоянное использование структур ситуационного управления. Перед вылетом из системы подготовки к вылету группы самолетов (самолета) в базу знаний БОСЭС ТС загружается априорная информация. По каждой значимой для выполнения ТС проблемной субситуации БОСЭС ТС вырабатывает для экипажа рекомендации по ее разрешению с краткими пояснениями.

Рекомендации и пояснения к ним появляются на ИУП (информационная часть) ка-

бины экипажа. Экипаж вправе не принять предложенную БОСЭС рекомендацию и решить возникшую ПрС/С другим способом, ничего не сообщая об этом БОСЭС ТС. При этом следующую рекомендацию БОСЭС ТС должна будет уже выработать с учетом реализованного экипажем решения. Любое игнорирование экипажем предложенной из БОСЭС ТС рекомендации фиксируется в бортовой системе объективного контроля и после окончания полета эта информация передается во внебортовую систему послеполетного анализа результатов.

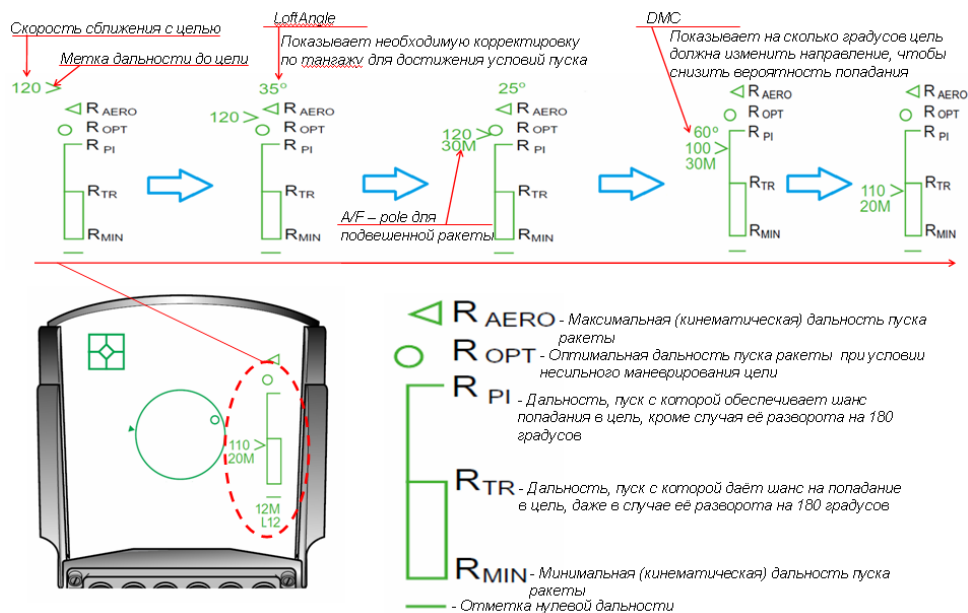


Рис. 3. Динамические дальности пуска AIM-120 для ТБС ДБВ1х1 в ПрС/С «Нападение».

Пример работы фрагмента такой базы знаний БОСЭС ДБВ1×1, реализованный в БЦВМ истребителя F-16 [4] показан на рис.3.

На БЛА тактические задачи второго ГЛУУ) решаются так же как их решают БОСЭС ТС. Но вырабатываемые интеллектуальной системой решения сразу идут на автоматическую реализацию, что и отражается в названии этих интеллектуальных систем (бортовые оперативно *решающие* экспертные системы типовых/типовых боевых ситуаций (БОРЭС ТС)).

## 4. Разработка практически значимых БОСЭС ТС

К разработке практически значимых БОСЭС ТС в середине 80-х годов прошлого столетия практически одновременно приступили в СССР, США и Израиле. И прежде всего БОСЭС ТС были востребованы для типовых боевых ситуаций (ТБС) самолетов истребителей – той разновидности ТС, которая характеризуется агрессивностью внешней обстановки и жесткими временными ограничениями на работу экипажа.

Облик нормативно-техническая документация для разработки БОСЭС ТС представлен в [13]

Разработка БОСЭС ТС проходит следующие технологические этапы, каждый из которых по степени завершенности будем представлять четырьмя стадиями:

А (1,2,3,4). Изучение и формализация ТС с задачей выявления семантической сети ПрС/С и конструирования ситуационных векторов SV(ТС) и SV(ТС-ПрС/С), позволяющих идентифицировать соответственно ТС и ПрС/С в ней.

Б (1,2,3,4). Формирование множества значимых событий ТС и оптимальных (рациональных) способов решения каждой задачи в каждой ПрС/С.

В (1,2,3,4). Формирование в базе знаний БОСЭС ТС адекватных ТС моделей мира и механизмов вывода для каждой ПрС/С.

Г (1,2,3,4). Создание исследовательского образца БОСЭС ТС и системы имитационного моделирования (СИМ) для отработки фрагментов (по ПрС/С) базы знаний БОСЭС ТС.

Д (1,2,3,4). Создание базового образца БОСЭС ТС, способного относительно легко адаптироваться к бортовой информационной среде современных и разрабатываемых самолетов.

## **5. О подготовки специалистов по бортовым интеллектуальным системам [16]**

При переходе высшей школы на двухуровневую подготовку (бакалавры и магистры) к выпускаемым специалистам, призванным разрабатывать практически значимые БИС-Т/З целесообразно предъявлять следующие требования:

А) магистры должны владеть семантической моделью авиационного комплекса и использовать ее при работе с экспертами при формализации предметной области; должны уметь разрабатывать базы знаний бортовых интеллектуальных систем; уметь выделять и формализовать предметные области для БОСЭС ТС. При разработке баз знаний БОСЭС ТС ставить и конструктивно решать оптимизационные задачи; создавать компьютерные системы имитационного моделирования (СИМ) для отработки баз знаний БИС-Т/З, отрабатывать базы знаний БИС-Т/З на созданных СИМ;

Б) бакалавры должны уметь реализовать представленную базу знаний; создавать компьютерные системы имитационного моделирования для отработки баз знаний БИС-Т/З; выпускать соответствующую техническую документацию.

## **6. Заключение**

1) Отличительной особенностью современного проектирования АиИО наиболее совершенных авиационных комплексов [14] является переход к новой макромоделли авиационных комплексов «Этап», позволяющей инженерам при проектировании бортового алгоритмического и индикационного обеспечения (АиИО) постоянно держать в поле зрения всю заданную для проектируемого летательного аппарата (ЛА) совокупность генеральных задач вылета (ГЗВ) и всю совокупность типовых ситуаций для каждой ГЗВ. В модели «Этап» не только возможна, но и естественно необходима постановка проблемы решения задач системообразующего ядра ЛА (так называемых тактических задач):

- оперативного целеполагания (назначение текущего этапа полета),
- выбора рационального способа достижения оперативно назначенной цели выполняемого этапа полета.

2) Для решения «тактических задач» на летательных аппаратах (самолеты, вертолеты, беспилотные ЛА) должны быть реализованы на борту интеллектуальные системы поддержки процесса решения тактических задач (БИС-Т/З) двух типов:

2.1) интеллектуальные системы оперативного целеполагания (задачи ПЛУУ в модели «Этап»):



- для пилотируемых летательных аппаратов (ЛА): интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ), обеспечивающая экипаж полноценной информационной моделью внешней и внутрибортовой обстановки с выделением и ранжированием в ней внешних и внутрибортовых угроз, позволяющей экипажу оперативно назначать текущую цель полета;
- для беспилотных ЛА (БЛА): интеллектуальная система «Оперативное целеполагание» (ИИС ОЦП), автоматически назначающая текущую цель полета БЛА.

2.2) интеллектуальные системы оперативного нахождения способа (задачи ПГЛУУ в модели «Этап»):

- для пилотируемых летательных аппаратов (ЛА): бортовые оперативно советуемые экспертные системы типовых ситуаций/этапов полета (БОСЭС ТС), предоставляющих экипажу найденный способ решения проблем этой ТС для принятия экипажем решения на реализацию рекомендуемого способа;
- для беспилотных ЛА: бортовые оперативные решающие экспертные системы типовых этапов/ситуаций полета (БОРЭС ТС), отравляющих на реализацию найденный способ достижения поставленной цели назначенной ТС/назначенного этапа полета.

## Список литературы

1. Системы управления вооружением истребителей: основы интеллекта многофункционального самолета./ Под ред. акад. РАН Е.А. Федосов. Российская академия ракетных и артиллерийских Наук. М. Машиностроение, 2005. 399 с.
2. Федунов Б.Е. Макромодель пилотируемых летательных аппаратов для разработки алгоритмов бортового интеллекта // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 3. Приложение «Управление и информатика в авиакосмических системах». С. 13-16.
3. Грибков В.Ф., Федунов Б.Е. Бортовая информационная интеллектуальная система «Ситуационная осведомленность экипажа» для боевых самолетов // В кн. «Интеллектуальные системы управления». Под редакцией акад. РАН С.Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2010. С. 108-116.
4. F-16 A/B Mid-Life Update Production Tape M3 The Pilot's Guide 2004 by Lockheed Martin Corporation. [http://www.airwar.ru/other/bbl\\_r.html](http://www.airwar.ru/other/bbl_r.html)
5. Федунов Б.Е. Бортовые оперативно советуемые экспертные системы тактических самолетов пятого поколения (обзор по материалам зарубежной печати). М.: НИЦ ГосНИИАС, 2002.
6. Федунов Б.Е. Базовая алгоритмическая оболочка бортовых оперативно советуемых экспертных систем типовых ситуаций функционирования объекта // Изв. РАН. ТиСУ. 2009. № 5. С. 90-101.
7. Федунов Б.Е., Грибков В.Ф., Махов Е.А., Щербаков С.В. Концепции бортовых оперативно советуемых экспертных систем интеллектуальной поддержки экипажей вертолетов // Труды ГосНИИАС. 2008.
8. Федунов Б.Е., Махов Е.А., Грибков В.Ф., Щербаков С.В. Системы интеллектуальной поддержки экипажа вертолета // 8 Вертолетный форум МАИ. 2008. Тезисы доклада.
9. Гейтс Билл. Бизнес со скоростью мысли. Пер. с английского. М.: Эксмо-пресс, 2001.
10. Федунов Б.Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советуемых экспертных систем // Изв. РАН. ТиСУ. 2002. № 4
11. Федунов Б.Е., Шестопапов Е.В.. Оболочка бортовой оперативно советуемой экспертной системы для типовой ситуации полета «Ввод группы в воздушный бой» // Изв. РАН. ТиСУ. 2010. № 3. С. 86-103.
12. Демкин М.А., Тищенко Ю.Е., Федунов Б.Е. Базовая бортовая оперативно советуемая экспертные системы для дуэльной ситуации дальнего воздушного боя // Изв. РАН. ТиСУ. № 4. С. 59-75.
13. Козловских Б.Д., Федунов Б.Е. Нормативно-техническая документация при разработке БОСЭС. Стандартизация и унификация АТ // Вопросы авиационной науки и техники. 1995. Вып. 1-2.
14. Федунов Б.Е. Интеллектуальные системы тактического уровня на борту летательных аппаратов: фрагменты их баз знаний (аналитический обзор по материалам зарубежной информации). Под общей редакцией акад. РАН Е.А.Федосова. М.: Научно-информационный центр ГосНИИАС, 2013. 131 с.
15. Walter B. Cannon. The Wisdom of the Body. 1932.
16. Федунов Б.Е.. Подготовка специалистов по бортовым интеллектуальным системам пилотируемых летательных аппаратов: Научное издание // Материалы методического семинара «Разработка механизмов практического масштабного внедрения профессиональных стандартов по направлению «Авиастроение». Уфа: УГАТУ. 2007. С. 113-121.