

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 629.7.05: 004.94

DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-104-116

Подход к оценке сложных технических систем на ранней стадии разработки

А.В. Полтавский¹, С.С. Семенов²

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

² АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Москва, Россия

Аннотация

Рассматривается подход к оценке сложных технических систем на ранней стадии их разработки. В качестве сложных технических систем исследуются комплексы с многофункциональными беспилотными летательными аппаратами двойного назначения. Новизна работы заключается в комплексировании оценки путём структурирования методов и стохастических моделей анализа сложных технических систем в технологической компьютеризированной среде разработчика, выбора стратегии принятия решений на этапах предварительного проектирования, включающей метод экспертных оценок. На примере беспилотных летательных аппаратов показана технология выбора рационального варианта сложных технических систем из числа альтернатив сформированного модельного ряда с помощью информационно-аналитической системы. В информационно-аналитической системе реализована процедура многокритериальной оценки сложных технических систем, основанная на методах экспертных оценок. Получены первичные результаты комплексной оценки разведывательно-ударных и ударных комплексов многофункциональных беспилотных летательных аппаратов массой 0,3-2 т.

Ключевые слова: моделирование, сложная система, технический уровень, беспилотный летательный аппарат, оптимизация, качество.

Цитирование: Полтавский, А.В. Подход к оценке сложных технических систем на ранней стадии разработки / А.В. Полтавский, С.С. Семенов // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, № 1(39). – С. 104-116. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-104-116.

Введение

На ранних стадиях проектирования и анализа объектов двойного назначения используются методы, модели и алгоритмы оптимизации сложных технических систем (СТС), обеспечивающие заданные тактико-технические характеристики (ТТХ). При этом используются системы имитационного моделирования и поддержки принятия решений в среде информационно-аналитических систем (ИАС).

Качество объектов СТС определяется совокупностью характеристик и свойств, обуславливающих пригодность к удовлетворению определённых потребностей¹. Многообразие этих свойств определяет набор показателей качества. К ним относятся показатели, учитывающие назначение, надёжность, технологичность, стандартизацию и унификацию, транспортабельность, безопасность, а также эргономические, эстетические, экологические, патентно-правовые и экономические показатели объектов СТС. Кроме понятия качества продукции

¹ См. также ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (Издание с поправкой). Дата введения 2015-11-01. *Прим. ред.*

существует термин технический уровень (ТУ)², отражающий степень использования мировых научно-технических достижений для её создания. ТУ *определяется тем же составом показателей, что и качество продукции*, за исключением экономических показателей. Оценки показателей качества СТС получают на базе информационных моделей, адекватных процессам функционирования объектов СТС.

Динамично развиваются сегодня СТС – беспилотные многоцелевые летательные аппараты (БЛА), которые используются в различных странах мира.

В статье рассматриваются объекты комплекса БЛА (КБЛА) [1-4]. Многофункциональный КБЛА представляет совокупность взаимоувязанных в единую структурно-функциональную систему БЛА и наземных технических средств, обеспечивающих применение БЛА в воздухе, а также техническую эксплуатацию на земле. Структурный состав объектов для многофункциональных КБЛА может изменяться в зависимости от решаемых задач, их масштабов, видов действий и условий применения БЛА по назначению.

1 Технический облик беспилотных летательных аппаратов

Под техническим обликом БЛА понимается совокупность количественных показателей и параметров, количественно-качественных характеристик и свойств, определяющих конструктивно-аэродинамическую схему БЛА, его силовую установку, а также состав и характеристики свойств комплекса бортового оборудования и вооружения, обеспечивающая реализацию заданных ТТХ [5].

Многофункциональный КБЛА – это КБЛА, выполняющий функции разведки, доставки различных грузов, удара, ретранслятора, мониторинга пространства, патрулирования и др., который может использоваться в радиационной, химической, бактериологической обстановке. Эффективность КБЛА характеризуется степенью соответствия результатов проводимой операции и её цели, обуславливается показателями их качества и оценивается по критериям оптимальности. Особенности выбора многофункционального КБЛА, в том числе по критерию ТУ приведены в работах [4, 6].

При исследовании КБЛА в задачах оптимизации за критерий оптимальности принимают вероятность выполнения возложенной задачи. Оценку вероятности выполнения задачи можно представить $\hat{P}_{вз} = P(\theta)$, где $P(\theta)$ – вероятность выполнения задачи; θ – событие, которое связано с условием выполнения задач для БЛА, т.е. с конечной целью операции. Случайность события θ является следствием множества воздействий на КБЛА.

Анализ данных в такой постановке задачи сводится к определению основных групп показателей функциональной эффективности.

- Задачи обнаружения и распознавания объектов-целей (пожары, наводнения, поиск и др.) связаны с вероятностью обнаружения объекта-цели в заданных диапазонах условий возможного применения и с вероятностью распознавания объекта-цели в заданных диапазонах условий возможного применения.
- Задачи по доставке грузов к объекту-цели связаны с вероятностью доставки груза к объекту-цели.
- Задачи контроля (мониторинга) окружающей среды, связаны с вероятностями выполнения задач ретрансляции данных, постановки помех, радиационной, бактериологической и химической разведки, патрулирования границ, поиска пожаров, пропавших людей.

² Определение понятий «качество» и «технический уровень» продукции приведено в ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения», а также в ГОСТ 2.116-84 «Карта технического уровня и качества продукции».

Вероятностные показатели и характеристики являются важными при оценке качества продукции на ранних стадиях предварительного анализа и проектирования СТС.

2 Моделирование анализа технического облика СТС

2.1. Постановка задачи исследования

Подходы к разработке информационных моделей анализа технического облика СТС могут быть различными. Можно выделить три основных направления: построение стохастических моделей, экспертные оценки, гибридные модели [7, 8]. Данные методы, как правило, ориентированы на получение первичных показателей и основных характеристик СТС, связанных с понятием «технический облик».

Для реализации первого подхода применяют методы статистической динамики, статистической линеаризации [7], канонических разложений [9], метод неградиентного случайного поиска (НСП) [10] и др. Для проведения оценки объектов СТС применяют множество методов экспертных оценок с различными подходами. Они также важны в прогнозном моделировании и в задачах проектирования объектов КБЛА. Для реализации комбинированного подхода к оценкам СТС требуются концептуальные описания объектов в виде информационных моделей для анализа показателей и основных характеристик в среде ИАС.

2.1.1 Построение стохастических моделей анализа многофункциональных КБЛА

Назначение КБЛА во многом определяется конечной целью типовой операции: обнаружение и распознавание объекта-цели $P_{по} = F(P_{обн}, P_p)$, доставка грузов к объекту-цели, оцениваемой вероятностью доставки груза $P_{ц}$. В данной работе используется метод НСП, в котором алгоритмы выбираются исходя из сравнении вектора состояния $Y(t)$ системы с выходным сигналом желаемого (требуемого) процесса Y_T [10].

Формальная связь характеристик входного $X(t)$ и выходного сигналов $Y(t)$ определяется оператором системы $A(Y, X; t)$. Изменять оператор $A(\cdot)$ можно путём изменения некоторых управляющих звеньев СТС, которые связаны с блочной матрицей S_c , в которую, как правило, включаются искомые параметры объекта СТС и выбираемая модель из блоков базы данных.

При этом $Y(t) = A(Y, X, S_c; t)X(t)$. Изменяя оператор $A(Y, X, S_c; t)$ с помощью матрицы S_c , можно осуществить сближение $Y(t)$ и Y_T . Управление качеством – это информационный процесс в ИАС, основной задачей которого является сближение $Y(t)$ и Y_T , наличие отклонения в их значениях свидетельствует о потере качества. Чтобы отклонениям придать свойство измеримости, принимается функция потерь $\ell(Y, Y_T)$ [7, 10, 11]. Преобразуя функцию потерь [4, 10], можно получить критерий оптимизации СТС $P(\theta|S_c, A_v) \max_v$, в котором параметры управляющей матрицы будут оптимизированы при равенстве $S_o = S_c$ в модели A_v . Решения для A_v выбирают из модельного ряда – набора однородных типовых объектов в КБЛА, характеризующихся именем, признаками, входными и выходными параметрами, средой функционирования.

Оптимизированные оценки $P_{по}$, $P_{обн}$, P_p , $P_{ц}$ и др. показателей многофункциональных КБЛА находятся по условию максимума для свёртки критерия $P(\theta) = \max P(\theta|S_o)$. Критерии изменяются под воздействием управляющей матрицы S_c , связанной с событиями для звеньев модельного ряда $A_1, A_2, \dots, A_v, \dots, A_N$, с учётом основных принимаемых ограничений [4, 7, 11].

Таким образом, свёртка критерия может иметь вид:

$$P(\theta|S_o) = \max_{A_v, S_{c1}} F(S_{c1}, A_v), \quad F(S_{c1}, A_v) = \frac{P(A_v|\theta) f_{\theta}(S_{c1}|\theta, A_v)}{P(A_v) f_v(S_{c1}|A_v)}, \quad (v = \overline{1, N}),$$

где S_{Cl} – матрица искомым параметров (часто принимаются коэффициенты закона управления БЛА, коэффициенты алгоритма калмановской фильтрации и др.); A_v – элементы матрицы модельного ряда и v -го сочетания управляющей матрицы S_C ; $f_{\theta}(\cdot)$ – плотность вероятности события θ и события A_v ; $f_v(\cdot)$ – плотность вероятности для события A_v ; $P(A_v)$ – вероятность события A_v и $P(A_v|\theta)$ – условная вероятность события A_v .

Достоинством изложенного подхода является построение согласованной системы моделей для получения оценок основных показателей, характеризующей степень совершенства объектов в КБЛА [4, 6].

2.1.2 Критерий эффективности объектов СТС на ранних стадиях разработки

Анализ процесса создания продукции нового качества позволяет установить, что определяющим условием успешной разработки является наличие достаточного количества элементов новизны [12]. Для определения стратегий оптимального развития СТС предлагается использовать модель с элементами новизны и преемственности разрабатываемой СТС, которая позволяет воспользоваться показателем эффективности следующего вида:

$$F_{\text{эфф}} = f(K_0, v, R, t),$$

где K_0 – характеристика качества облика создаваемых объектов СТС;

v – характеристика уровня разработки по показателям преемственности и новизны;

R – характеристика ресурсного обеспечения;

t – временная технологическая характеристика.

С помощью информационной модели с использованием системы показателей и основных характеристик КБЛА производится оценка качества структуры БЛА на протяжении всего жизненного цикла. При различных испытаниях используется соответствующая группа показателей качества и функциональной эффективности. В зависимости от решаемой задачи проекта на множестве частных сформированных показателей качества формируется критерий эффективности.

2.2 Структурно-параметрическая оптимизация моделей БЛА

Теоретико-вероятностные методы анализа и исследования СТС получили широкое применение на ранних стадиях разработки БЛА. Для оптимизации БЛА с использованием метода НСП принята функция потерь [10, 11]:

$$\ell(Y, Y_T) = \begin{cases} \ell_1, & \text{при } \bar{\theta}(Y, Y_T), \\ 0, & \text{при } \theta(Y, Y_T), \end{cases}$$

в которой ℓ_1 – величина потерь; Y_T – требуемый вектор выходных сигналов СТС; Y – моделируемый выходной сигнал; $\theta(Y, Y_T)$ – событие, состоящее в том, что при конкретной реализации входного сигнала X реализация выходного сигнала Y удовлетворяет требованию близости к требуемому Y_T .

Среднее значение функции потерь определяется из выражения

$$M[\ell(Y, Y_T)|S_c] = \ell_1 [1 - P(\theta(Y, Y_T)|S_c)],$$

где $P(\theta(Y, Y_T)|S_c)$ – вероятность события $\theta(Y, Y_T)$ при фиксированных значениях элементов управляющей матрицы S_c , связанной с управляющими звеньями системы.

За критерий оптимальности в структурно-параметрической оптимизации СТС с применением НСП принимается минимальное условное среднее значение функции потерь [4, 6]. Таким образом, при любых значениях ℓ_1 справедливо следующее равенство:

$$M[\ell(Y, Y_T) | S_o] = \max_{\forall S_c \in \Omega_c} P(\theta(Y, Y_T) | S_c),$$

где S_o – оптимальная управляющая матрица; Ω_c – допустимая область поиска.

Сложное событие θ в имитационном моделировании типовых функциональных задач для БЛА состоит из ряда событий: старта $\theta_{ст}$, полета по маршруту $\theta_{п}$, преодоления угроз БЛА $\theta_{уг}$, выхода в район объекта-цели (ОЦ) $\theta_{вых}$, обнаружения ОЦ $\theta_{по}$, доставки груза ОЦ $\theta_{оц}$ и др.

Информационная вероятностная модель применения многофункционального БЛА представляет собой обобщенную вероятностную модель процесса в пространстве состояний. Данная модель отражает основные свойства СТС с позиций теоретико-вероятностного подхода, отображает основные этапы применения объектов и определяет аналитическую связь для вероятностей состояний и переходных вероятностей. Последние по существу представляют собой вероятности решения задач того или иного этапа применения КБЛА [4, 6, 11].

Таким образом, представленная информационная математическая модель также необходима для получения первичной оценки вероятностных показателей к характеристикам ТУ в среде ИАС наряду с экспертными оценками.

3 Выбор рационального варианта объектов КБЛА

3.1 Принцип выбора БЛА

Выбор объектов для СТС с использованием модели БЛА предполагает многокритериальное оценивание множества показателей в компьютерной среде и соответствующей концепции [13]. Критерий качества задаётся, исходя из смысла решаемой задачи СТС. Для принятия решения по вероятностным показателям и характеристикам в процедурах НСП, а также при поиске лучшей модели альтернативных вариантов объектов из базы данных многофункциональных КБЛА может быть использована также экспертная оценка в среде ИАС.

Пусть a - допустимая альтернатива модели объекта СТС и A - множество всех допустимых альтернатив. Пусть каждому действию или выбору a из A соответствует совокупность показателей $J_1(a), \dots, J_m(a)$. Можно считать, что m показателей J_1, \dots, J_m отображает каждое a из A в некоторой точке m -мерного пространства исходов действий.

Задача состоит в таком выборе a из A , чтобы получить оптимальный в отношении принятого критерия вариант из $J_1(a), \dots, J_m(a)$, т.е. нужна «свёртка» для критерия, которая бы объединяла всю совокупность $J_1(a), \dots, J_m(a)$ в скалярный показатель предпочтительности.

3.2 Пример выбора БЛА с помощью ИАС

ИАС «Оценка и выбор» относится к системам поддержки принятия решений и базируется на использовании многокритериального анализа методом экспертных оценок [14].

Выбор СТС осуществляется с использованием известных математических методов теории принятия решений [15, 16] и современных информационных технологий [17]. Разведывательно-ударные и ударные БЛА можно разделить по взлётной массе на четыре класса: 0,3-2 т – класс 1; 2-6 т – класс 2; 6-13 т – класс 3; 13-25 т – класс 4. Для сравнительного анализа были выбраны существующие и разрабатываемые БЛА, принадлежащие классу 1.

Основные ТТХ разведывательно-ударных и ударных БЛА, которые приняты в качестве оценочных показателей, приведены в таблице 1.

Совокупность оценочных показателей определяет техническое совершенство БЛА, а степень их значимости определяется коэффициентом весомости каждого из них. В такой постановке лучшим образцом БЛА признается тот, который «набрал» при анализе наибольшее число баллов (рейтинг). Рейтинг альтернативы (образца БЛА) рассчитывается по формуле:

$$R(i) = \sum_j W_j \cdot R_j(i),$$

где W_j – весовой коэффициент интегрального показателя j ,

$R_j(i) = \sum W_{kj} U_{kj}(i)$ – рейтинг альтернативы i по интегральному показателю j .

W_{kj} – вес единичного показателя k интегрального показателя j ;

$U_{kj}(i)$ – значение функции ценности единичного показателя k альтернативы i интегрального показателя j .

Таблица 1 – Основные характеристики БЛА массой 0,3-2 т (класс 1) для проведения сравнительного анализа

Наименование БЛА (страна)	Взлётная масса $M_{ВЗЛ}$, кг	Масса боевой нагрузки $M_{БН}$, кг	Дальность полёта $D_{П}$, км	Продолжительность полета $T_{П}$, ч	Высота полета (практический потолок) $H_{П}$, м	Максимальная скорость полёта $V_{МАКС}$, км/ч	Количество точек подвески n , ед.	Стоимость БЛА $C_{БЛА}$, млн. долл.
«Форпост-М» (Россия)	454	100	500	17,5	5000	200	2	7,5
«Дозор-600» (Россия)	640	220	3700	30	7500	210	–	6
«Гермес 900» (Израиль)	1180	350	4000	36	9145	220	2*	12*
«Орион-1 (Э)» (Россия)	1200	200	600	24	8000	200	2	6
«Импакт 1300» (Израиль)	1300	400	1500	30	9000	250	2*	9*
СН-4В (Китай)	1350	345	1600	14	7000	250	4	4
«Вин Лун-1D» (Китай)	1500	400	2000	35	7500	280	4	8*
MQ-1C «Грэй Игл» (США)	1634	478	8000	36	8840	280	4	17*
«Рустом-2» (Индия)	1800	350	900	24	10660	300	2	10

* Экспертная оценка

В качестве основных оценочных показателей при сравнительном анализе многофункциональных БЛА приняты нормированные показатели, представленные в таблице 2. Они образуют интегральный показатель «качество» (ТУ – совокупность свойств объекта, отражающих его техническое совершенство [18]). Коэффициенты весомости оценочных показателей разработаны по результатам обработки оценок десяти экспертов, в качестве которых были привлечены специалисты в области конструирования и аэродинамики БЛА, систем наведения и управления, системного анализа и боевой эффективности комплексов авиационного вооружения.

Таблица 2 – Перечень нормированных оценочных показателей БЛА и их значимость

Наименование оценочного показателя	Значимость показателя (коэфф-т весомости W)
Взлётная масса $M_{ВЗЛ}$	0,125
Масса боевой нагрузки $M_{БН}$	0,150
Дальность полета $D_{П}$	0,150
Продолжительность полета $T_{П}$	0,125
Высота полета (практический потолок) $H_{П}$	0,100
Скорость полета (максимальная) $V_{МАКС}$	0,100
Количество точек подвески (УР и УАБ) n	0,150
Стоимость БЛА $C_{БЛА}$	0,100

Полученные функции ценности оценочных показателей представлены на рисунке 1.

При формировании функции ценности по каждому оценочному показателю принимаются во внимание функциональное предназначение БЛА, основные требования по ТТХ, предъявляемые к данному классу БЛА, учитываются предпочтения по выбору концепции развития СТС или конкретных технических решений.

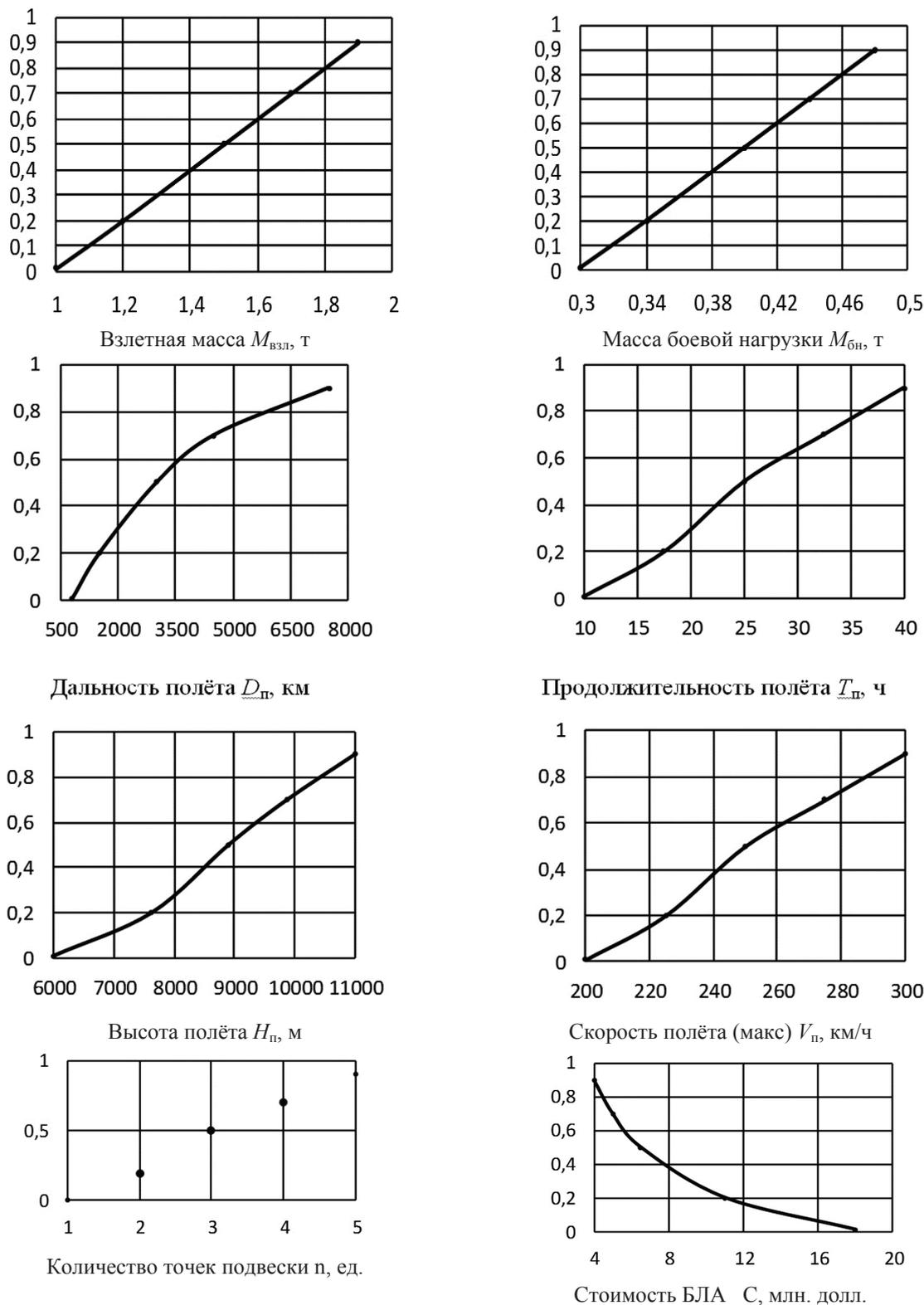


Рисунок 1 – Функции ценности для оценочных показателей при проведении сравнительного анализа БЛА массой 0,3-2 т (класс 1)

Соотношение качественной и количественной оценок представлено в таблице 3. Итоговые результаты сравнительного анализа БЛА представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Численные значения оценки и их словесная интерпретация

Рейтинг	Лингвистическая интерпретация (в виде высказываний)
0.00 – 0.05	«Минимально приемлемо»
0.05 – 0.15	«Очень посредственно»
0.15 – 0.25	«Посредственно»
0.25 – 0.35	«Вполне удовлетворительно»
0.35 – 0.45	«Почти хорошо»
0.45 – 0.55	«Хорошо»
0.55 – 0.65	«Очень хорошо»
0.65 – 0.75	«Почти отлично»
0.75 – 0.85	«Отлично»
0.85 – 0.95	«Замечательно»

Таблица 4 – Итоговые результаты анализа многофункциональных БЛА массой 0,5-2 т (класс 1)

Моделируемый объект БЛА	Место	Баллы
MQ-1C «Грей Игл» (США)	1	677
«Вин Лун-1D» (Китай)	2	515
«Рустом-2» (Индия)	3	431
«Импакт 1300» (Израиль)	4	387
СН-4В (Китай)	5	382
«Гермес 900» (Израиль)	6	373
«Дозор-600» (Россия)	7	310
«Орион-1 (Э)» (Россия)	8	211
«Форпост-М» (Россия)	9	98

Из таблицы 4 следует, что по совокупности оценочных показателей по рейтингу на первые места вышли MQ-1C «Грей Игл» (США), «Вин Лун-1D» (Китай), «Рустом-2» (Индия).

На рисунке 2 представлено изображение рабочего окна монитора в среде ИАС «Оценка и выбор» с результатами сравнительного анализа БЛА по двум методам – методу взвешенного суммирования и методу идеальной точки, соответственно.

ИАС «Оценка и выбор» позволяет провести анализ по каждому типу БЛА, выявить картину основных свойств. Например, БЛА «Дозор-600» занял седьмое место, так как получил низкую оценку по оценочным показателям «Взлётная масса» и «Масса боевой нагрузки». Одной из причин такой оценки может быть то, что взлётная масса и масса боевой нагрузки у данного БЛА оказалась меньше заданной нижней границы функций ценности.

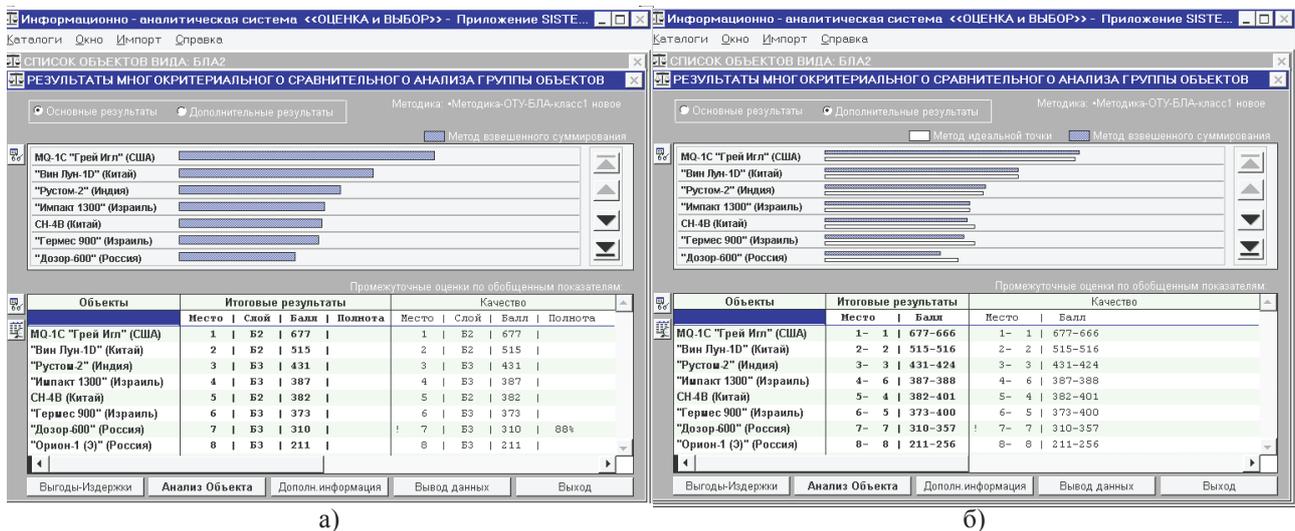


Рисунок 2 – Результаты анализа БЛА в ИАС «Оценка и выбор»:

- а) по методу весовых коэффициентов (взвешенного суммирования);
- б) по двум методам (методу весовых коэффициентов и методу идеальной точки)

На рисунке 3 представлены результаты анализа по оценочным показателям БЛА MQ-1C «Грей Игл» (США), получившего высшую оценку, и отечественного БЛА «Дозор-600».

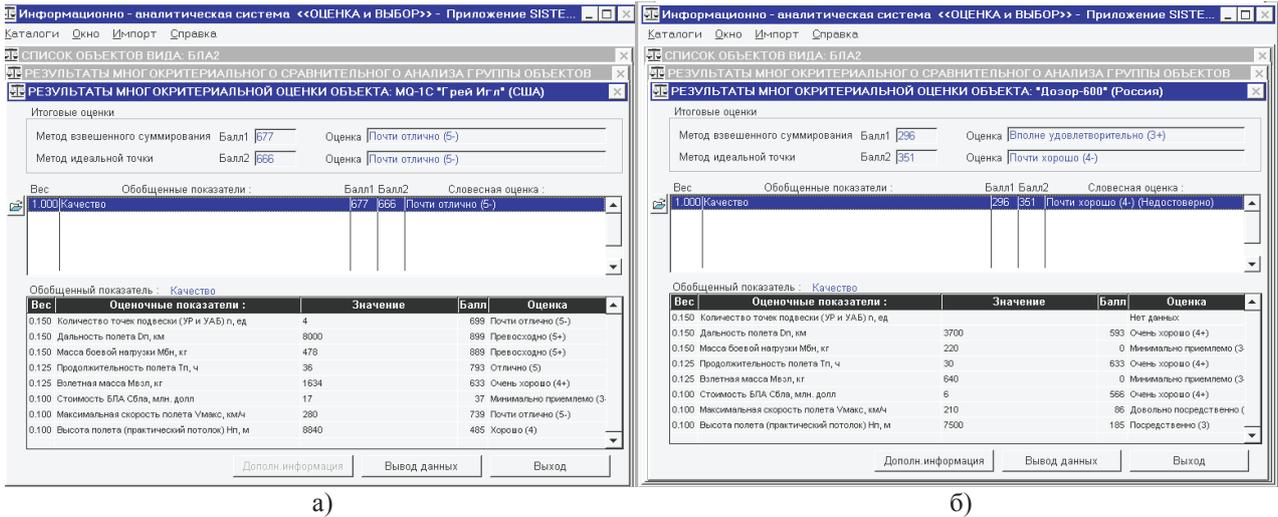


Рисунок 3 – Результат многокритериальной оценки БЛА в ИАС «Оценка и выбор»: а) MQ-1 «Грей Игл» (США); б) «Дозор-600» (Россия)

К числу основных задач, возлагаемых на разведывательно-ударные БЛА, относится доставка боевой нагрузки к цели, что показано на межпараметрических связях в системе координат «Масса боевой нагрузки Мбн, кг» – «Взлётная масса Мвзл, кг» (рисунок 4а) и «Масса боевой нагрузки Мбн, кг» – Дальность полета Dп, км» (рисунок 4б).

Представляют интерес межпараметрические связи между итоговым результатом и оценочными показателями «Взлётная масса Мвзл, кг», «Дальность полета Dп, км» (рисунок 5), «Масса боевой нагрузки Мбн, кг», «Стоимость СБЛА, млн. долл.» (рисунок 6).

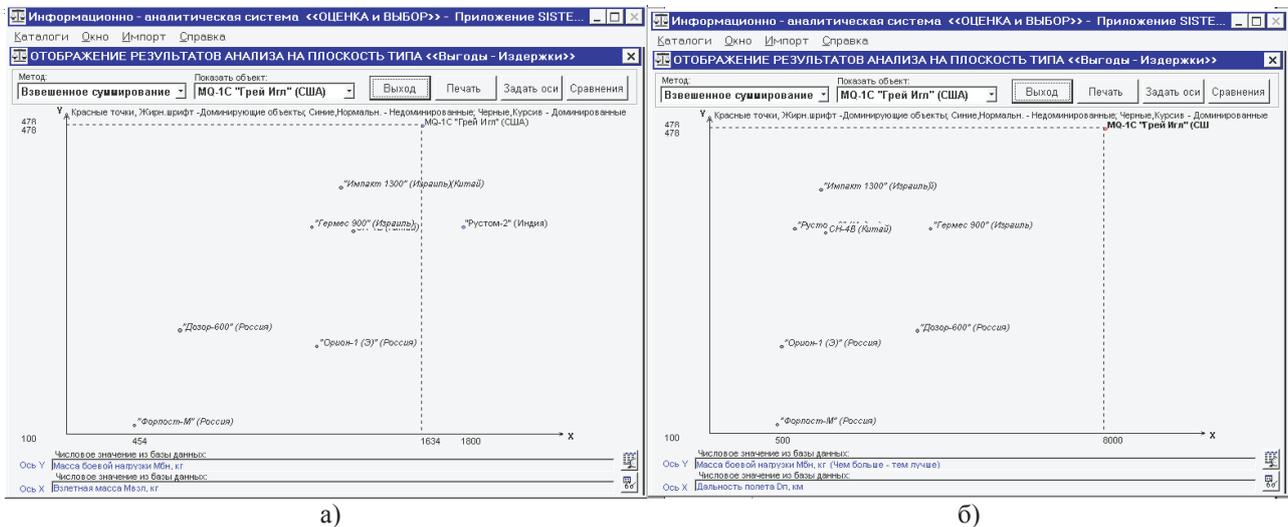


Рисунок 4 – Результат анализа БЛА MQ-1 «Грей Игл» (США) в ИАС «Оценка и выбор» в системе координат: а) «Масса боевой нагрузки Мбн, кг» – «Взлётная масса Мвзл, кг»; б) «Масса боевой нагрузки Мбн, кг» – «Дальность полета Dп, км»

Из анализа рисунков 4-6 следует, что по коэффициенту полезной нагрузки (отношение массы боевой нагрузки $M_{БН}$ к взлётной массе $M_{ВЗЛ}$) и максимальной дальности полета $D_{П}$, а, следовательно, максимальной транспортной производительности $T_{ПР}$ [19], наилучшим является разведывательно-ударный БЛА MQ-1С «Грей Игл» (США). Это соответствует первому месту в рейтинге исследуемых БЛА (таблица 4). При этом стоимость БЛА MQ-1С «Грей Игл» имеет наибольшее значение среди анализируемых БЛА.



Рисунок 5 – Результат анализа БЛА в среде ИАС «Оценка и выбор» в системе координат:
 а) «Итоговая оценка»– «Взлётная масса Мвзл, кг»; б) «Итоговая оценка»– «Дальность полета Dп, км»

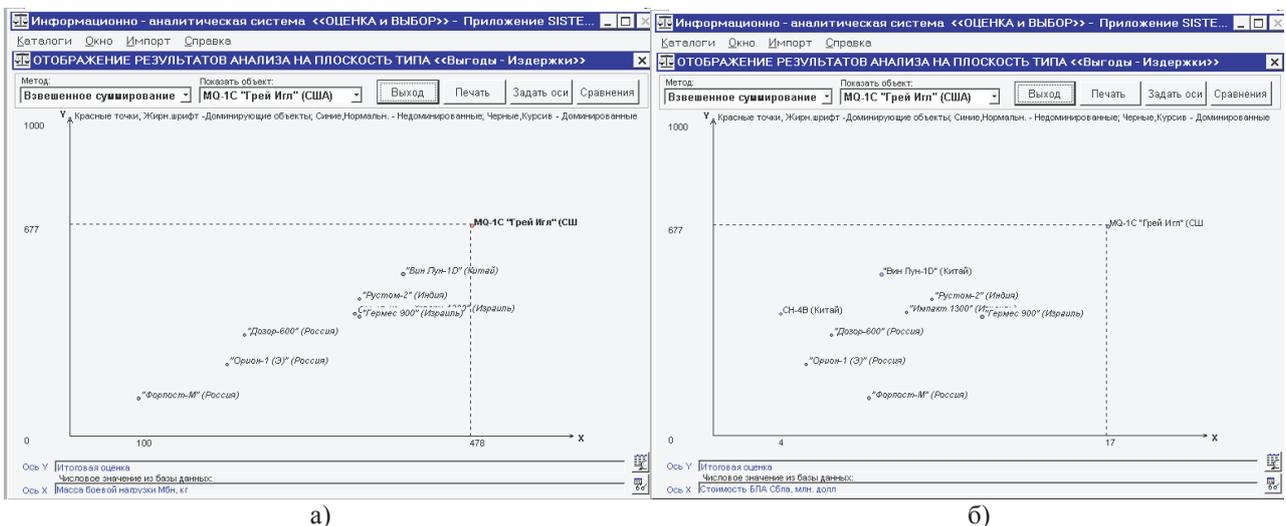


Рисунок 6 – Результат анализа БЛА в среде ИАС «Оценка и выбор» в системе координат:
 а) «Итоговая оценка»– «Масса боевой нагрузки Мбн, кг»; б) «Итоговая оценка»– «Стоимость СБЛА, млн. долл.»

Результаты информационного моделирования СТС и первичные оценки их показателей с основными характеристиками БЛА предоставляют возможность выбрать наиболее предпочтительный вариант разработки (или закупки) или выбора направлений исследований перспективных многофункциональных БЛА.

Заключение

Одним из подходов к оценке СТС может служить использование сочетаний теоретико-вероятностных методов и методов экспертных оценок с соответствующими информационными моделями и алгоритмами, реализующими их.

Процесс выбора БЛА из числа альтернативных при создании СТС показан на примере многофункциональных БЛА класса 1 с помощью ИАС «Оценка и выбор», в которой реализован многокритериальный метод оценивания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Reg, A.* Unmanned Aircraft systems. UAVS Design, Development and Deployment / A. Reg // Austin Reg. JohnWiley and Sons, Ltd. Publication, 2010. 332 p.
- [2] *Dougherty, M.J.* Drones / Martin J. Dougherty // An illustrated guide to the unmanned aircraft that are filling our skies. 2015. Amber Books Ltd.
- [3] *Jane's.* All the World's Aircraft. 2017-2018. 458 p.
- [4] *Полтавский, А.В.* Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов / А.В. Полтавский, А.А. Бурба, А.Е. Аверкин, В.В. Макаров, В.В. Маклаков // Под ред. Рубиновича Е.Я. – М.: ИПУ РАН, 2015. 204 с.
- [5] *Скопец, Г.М.* Внешнее проектирование авиационных комплексов: методологические аспекты / Г.М. Скопец. М.: Ленанд, 2017. – 344 с.
- [6] *Полтавский, А.В.* Информационные процессы в технике: моделирование систем и объектов многофункциональных робототехнических комплексов беспилотной авиации / А.В. Полтавский, С.С. Семенов, А.А. Бурба, Нгуен Зуи Фыонг // Под ред. Вишневого В.М. – Королев: АО «ПСТМ», 2019. 404 с.
- [7] *Казаков, И.Е.* Методы оптимизации стохастических систем / И.Е. Казаков, Д.И. Гладков. – М.: Наука, 1987. 304 с.
- [8] *Кульба, В.В.* Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В.В. Кульба, Е.Н. Микрин, Б.В. Павлов, В.Н. Платонов // Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: Наука, 2006. 579 с.
- [9] *Пугачёв, В.С.* Теория вероятностей и математическая статистика / В.С. Пугачёв. – М.: Физматлит, 2002. 496 с.
- [10] *Гладков, Д.И.* Оптимизация систем неградиентным случайным поиском / Д.И. Гладков. – М.: Энергоиздат, 1984. 256 с.
- [11] *Казаков, И.Е.* Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И.Е. Казаков, С.В. Мальчиков. – М.: Наука, 1983. 384 с.
- [12] *Саркисян, С.А.* Анализ и прогноз развития больших технических систем / С.А. Саркисян, В.М. Ахундов, Э.С. Минаев. – М.: Наука, 1983 г. 280 с.
- [13] *Пиявский, С.А.* Прогрессивность многокритериальных альтернатив / С.А. Пиявский // Онтология проектирования. – 2013 – № 4(10). – С.53-59.
- [14] *Семенов, С.С.* Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники / С.С. Семенов, В.Н. Харчев, А.И. Иоффин. – М.: Радио и связь, 2004. 552 с.
- [15] *Hwang, C.* Multiple Attribute Decision Making / C. Hwang, K. Yoon. Berlin/Heidelberg/New-York: Springer-Verlag, 1981. 259 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
- [16] *Han-Lin, Li.* Solving Discrete Multicriteria Decision Problems Based on Logic-Based Decision Support Systems / Li. Han-Lin. – North-Holland: Decision Support Systems, 1987. – Vol. 3(1). – P.101–119.
- [17] *Воронов, Е.М.* К оценке технического уровня сложных технических систем с учётом полного жизненного цикла / Е.М. Воронов, В.В. Щербинин, С.С. Семенов // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, №2(20). – С.173-192. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-173-192.
- [18] *Мышкин, Л.В.* Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика / Л.В. Мышкин. - М.: Физматлит, 2006. 304 с.
- [19] *Володин, В.В.* Беспилотная боевая авиация: исследование существующих программ, концепций и проектов / В.В. Володин // Научно-техническая информация ГосНИИАС. Авиационные системы. Юбилейный выпуск. 2006. – С.17-25.

Сведения об авторах



Полтавский Александр Васильевич, 1957 г. рождения, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Окончил с отличием ВВАИУ по специальности «Вооружение летательных аппаратов ВВС», адъюнктуру ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, к.т.н. по специальности «Вооружение и военная техника ВВС» (1995), д.т.н. по специальности «Информационно-измерительные и управляющие системы» (2012). Имеет 198 научно-технических статей, 12 книг, 8 монографий, 10 учебных пособий и 32 изобретения Российской Федерации. AuthorID (РИНЦ): 730821. Author ID (Scopus): 42673435. Researcher ID (WoS): 31020525. lab-54@bk.ru.

Семенов Сергей Сергеевич, 1942 г. рождения, руководитель группы анализа и перспективного проектирования АО «ГНПП «Регион». В 1963 г. окончил с отличием Московский радиомеханический техникум по специальности «Радиолокационные устройства», в 1969 г. – Московский инженерно-физический институт по специальности «Автоматика и электроника», кандидат технических наук (2010). Автор и соавтор 224 научно-технических статей, 8 монографий и 6 книг, 47 изобретений и 116 научных трудов. AuthorID (РИНЦ): 26334. gnppregion@sovintel.ru.



Поступила в редакцию 17.08.2020, после рецензирования 16.02.2021. Принята к публикации 26.02.2021.

An approach to assessing complex technical systems at an early stage of development

A.V. Poltavsky¹, S.S. Semenov²

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² 'Region' JSC, State Research and Production Enterprise, Moscow, Russia

Abstract

An approach to assessing complex technical systems at an early stage of their development is considered. Complexes with multifunctional dual-use unmanned aerial vehicles are being investigated as complex technical systems. The novelty of the work lies in the integration of the assessment by structuring the methods and stochastic models of the analysis of complex technical systems in the technological computerized environment of the developer, choosing a decision-making strategy at the stages of preliminary design, including the method of expert assessments. Using the example of unmanned aerial vehicles (UAVs), the technology of choosing a rational version of complex technical systems from among the alternatives of the formed model range using an information and analytical system (IAS) is shown. The IAS implements a procedure for multi-criteria assessment of complex technical systems based on the methods of expert assessments. The primary results of a comprehensive assessment of reconnaissance-strike and strike complexes of multifunctional UAVs weighing 0.3-2 tons have been obtained.

Keywords: modeling, complex system, technical level, unmanned aerial vehicle, optimization, quality.

Citation: Poltavsky AV, Semenov SS. An approach to assessing complex technical systems at an early stage of development [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(1): 104-116. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-104-116.

List of figures and tables

Figure 1 – Value functions for estimated indicators for comparative analysis of UAVs weighing 0.3-2 tons (class 1)

Figure 2 – The results of the analysis of multifunctional UAVs in the IAS «Evaluation and selection»: a) by the method of weighting factors (weighted summation); b) by two methods (method of weight coefficients and method of ideal point)

Figure 3 – The result of a multi-criteria assessment of a multipurpose strike UAV in the IAS «Evaluation and Selection»: a) MQ-1 «Gray Eagle» (USA); b) Dozor-600 (Russia)

Figure 4 – The result of the analysis of the UAV MQ-1 «Gray Eagle» (USA) in the IAS «Evaluation and Selection» in the coordinate system: a) «Mass of combat load M_{CBL} , kg» – «Takeoff weight M_{TOW} , kg»; b) «Mass of combat load M_{CBL} , kg» – «Flight range D_R , km»

Figure 5 – The result of the UAV analysis in the IAS «Evaluation and Selection»: a) «Final score» – «Takeoff weight M_{TOW} , kg»; b) «Final score» – «Flight range D_R , km»

Figure 6 – The result of the UAV analysis in the IAS «Evaluation and Selection»: a) «Final score» – «Mass of combat load M_{CBL} , kg»; b) «Final score» – «The cost of the UAV, million dollars»

Table 1 – Basic characteristics of UAVs weighing 0.3-2 tons (class 1) for comparative analysis

Table 2 – List of standardized UAV estimates and their significance

Table 3 – The numerical values of the assessment and their verbal interpretation

Table 4 – Final results of the analysis of multifunctional UAVs weighing 0.5-2 tons (class 1)

References

- [1] **Reg A.** Unmanned Aircraft systems. UAVS Design, Development and Deployment. *John Wiley and Sons*, Ltd. Publication, 2010. 332 p.
- [2] **Martin J. Dougherty.** Drones. An illustrated guide to the unmanned aircraft that are filling our skies. 2015 Amber Books Ltd.
- [3] **Jane's.** All the World's Aircraft. 2017-2018. 458 p.
- [4] **Poltavsky AV, Burba AA, Makarov VV, Maklakov VV.** Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles [In Russian]. Ed. Rubinovich E.Ya. Moscow: IPU RAN, 2015. 204 p.
- [5] **Skopets GM.** External design of aviation complexes: methodological aspects [In Russian]. Moscow: Lenard, 2017. 344 p.
- [6] **Poltavsky AV, Semenov SS, Burba AA, Nguyen Zui Phuong.** Information processes in technology: modeling of systems and objects of multifunctional robotic complexes for unmanned aviation [In Russian]. Ed. V.M. Vishnevsky. Korolev: JSC «PSTM», 2019. 404 p.
- [7] **Kazakov IE, Gladkov DI.** Optimization methods for stochastic systems [In Russian]. Moscow: Nauka, 1987. 304 p.
- [8] **Kulba VV, Mikrin EN, Pavlov BV, Platonov VN.** Theoretical foundations of information design control systems of spacecraft [In Russian]. Institute of Control Problems V.A. Trapeznikov RAN. Moscow: Nauka, 2006. 579 p.
- [9] **Pugachev VS.** Probability theory and mathematical statistics [In Russian]. Moscow: Fizmatlit, 2002. 496 p.
- [10] **Kazakov IE, Malchikov SV.** Analysis of stochastic systems in the state space [In Russian]. Moscow: Nauka, 1983. 384 p.
- [11] **Gladkov DI.** Optimization of systems by non-gradient random search [In Russian]. Moscow: Energoizdat, 1984. 256 p.
- [12] **Sarkisyan SA, Akhundov VM, Minaev ES.** Analysis and forecast of the development of large technical systems [In Russian]. M.: Nauka, 1983. 280 p.
- [13] **Piyavsky SA.** Progressiveness of multicriteria alternatives [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013, 4(10): 53-59.
- [14] **Semenov SS, Kharchev VN, Ioffin AI.** Assessment of the technical level of weapons and military technology [In Russian]. M: Radio and communication, 2004. 552 p.
- [15] **Hwang C, Yoon K.** Multiple Attribute Decision Making. Berlin/Heidelberg/New-York: Springer-Verlag, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
- [16] **Han-Lin Li.** Solving Discrete Multicriteria Decision Problems Based on Logic-Based Decision Support Systems. North-Holland: Decision Support Systems, 1987; 3(1): 101–119.
- [17] **Voronov EM, Scherbinin VV, Semenov SS.** To the assessment of technical level complex technical systems taking into account the whole life cycle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016, 6(2): 173-192. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-173-192.
- [18] **Myshkin LV.** Forecasting the development of aviation technology: theory and practice [In Russian]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 304 p.
- [19] **Volodin VV.** Unmanned Combat Aviation: Research of Existing Programs, Concepts and Projects [In Russian]. Scientific and Technical Information (Aviation systems). Anniversary edition. GosNIIAS 2006. P.17-25.

About the authors

Poltavsky Alexander Vasilyevich (b. 1957), leading researcher at the Institute of Control Sciences RAS. Graduated with honors from Military Aviation Engineering University (Voronezh) with a degree in Armament of Air Force aircraft, postgraduate studies at Zhukovsky Air Force Engineering Academy, PhD in Armament and military equipment of the Air Force (1995), PhD in the specialty of Information-measuring and control systems (2012). He has 198 scientific and technical articles, 12 books, 8 monographs, 10 textbooks and 32 inventions of the Russian Federation. AuthorID (RSCI): 730821. Author ID (Scopus): 42673435; Researcher ID (WoS): 31020525. lab-54@bk.ru.

Sergey Sergeevich Semenov (b. 1942), the head of the analysis and prospective design group “Region” JSC. In 1963, he graduated with honors from the Moscow Radio-Mechanical Technical School, specializing in Radar Devices, and in 1969 he graduated from the Moscow Engineering Physics Institute with a degree in Automation and Electronics, and in 2010 he received a Candidate of technical Sciences degree. He is the author and a co-author of 224 scientific and technical articles, 8 monographs and 6 books, 47 inventions and 116 scientific papers. AuthorID (RSCI): 26334. gnppregion@sovintel.ru.

Received August 17, 2020. Revised February 16, 2021. Accepted February 26, 2021.
