



**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ Т. СААТИ
ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА САМОЛЕТА И ВЕРТОЛЕТА
В КАЧЕСТВЕ ПОДВИЖНЫХ НОСИТЕЛЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ**

Т. М. Лифанова, М. Э. Громовой, С. В. Петренко

Лифанова Татьяна Михайловна, аспирант, ведущий инженер-конструктор, ПАО «НПО "Алмаз" им. академика А. А. Расплетина», г. Москва, Российская Федерация; eLIBRARY SPIN-код: 2628-9460, ORCID: 0009-0005-1927-5148, WSR ID: MVV-7496-2025, rid105526; e-mail: lifanova.tania@mail.ru;

Громовой Максим Эдуардович, аспирант, старший инженер, 170 военное представительство Министерства обороны Российской Федерации аккредитовано при АО «Московский машиностроительный завод "Авангард"», г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0009-0008-4658-3420, WSR ID: MVV-8985-2025, rid105450; e-mail: m.gromovoi@gmail.com;

Петренко Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, ПАО «НПО "Алмаз" им. академика А. А. Расплетина», г. Москва, Российская Федерация; eLIBRARY SPIN-код: 9242-6632, ORCID: 0009-0008-8842-4401; e-mail: viola349650@yandex.ru

В статье проводится сравнительный анализ двух классов авиационных носителей – самолета и вертолета – с позиций системного подхода к решению задачи радиолокационного наблюдения за воздушным пространством. Дано подробное описание применения метода анализа иерархий (МАИ) Т. Саати. Выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность применения бортовых радиолокационных станций (БРЛС) при обнаружении воздушных целей. Предложена система из семи критериев, объединенных в три группы: тактико-технические, эксплуатационные и специфические факторы носителя. Проведена их качественная и количественная оценка. Новизна работы заключается в формализованном применении МАИ для сравнительной оценки самолетных и вертолетных платформ с учетом вибрационных и электромагнитных помех, создаваемых самим носителем, что позволяет получить объективные количественные показатели эффективности. Оценки базируются на реальных тактико-технических характеристиках самолетов E-3 Sentry, A-50 и вертолетов Ка-31, AW101 Merlin. Показано, что самолет обладает безусловным преимуществом для стратегических задач ПВО, тогда как вертолет сохраняет уникальную нишу в тактическом звене при корабельном базировании и действиях в труднодоступных районах. Сделаны выводы об областях предпочтительного применения каждого типа носителя в зависимости от поставленных тактических задач.

Ключевые слова: системный анализ, воздушные носители, радиолокационная станция, обнаружение воздушных целей, самолет, вертолет, метод анализа иерархий, эффективность применения.

**APPLICATION OF THOMAS SAATY'S ANALYTIC HIERARCHY PROCESS
FOR A COMPARATIVE SYSTEM ANALYSIS OF AN AIRCRAFT AND A HELICOPTER
AS MOBILE PLATFORMS FOR AN RADAR**

T. M. Lifanova, M. E. Gromovoy, S. V. Petrenko

Lifanova Tatyana Mikhaylovna, postgraduate student, Lead Engineer, NPO Almaz named after A. A. Raspletin, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 2628-9460, ORCID: 0009-0005-1927-5148, WSR ID: MVV-7496-2025, rid105526; e-mail: lifanova.tania@mail.ru;

Gromovoy Maksim Eduardovich, postgraduate student, Senior Engineer, 170 Military representation of Ministry of Defence (Russia), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4658-3420, WSR ID: MVV-8985-2025, rid105450; e-mail: m.gromovoi@gmail.com;

Petrenko Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, NPO Almaz named after A.A. Raspletin, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 9242-6632, ORCID: 0009-0008-8842-4401; e-mail: viola349650@yandex.ru

The article presents a comparative analysis of two classes of aircraft carriers – an airplane and a helicopter – from the standpoint of a systemic approach to solving the problem of radar surveillance of airspace. A detailed description of the application of the analytic hierarchy process (AHP) by T. Saaty is given. Key factors influencing the effectiveness of using airborne radar stations in detecting air targets are identified. A system of seven criteria combined into three groups (tactical-technical, operational, and specific carrier factors) is proposed, and their qualitative and quantitative assessment is carried out. The novelty of the work lies in the formalized application of AHP for the comparative assessment of aircraft and helicopter platforms, taking into account vibration and electromagnetic interference generated by the carrier itself, which makes it possible to obtain objective quantitative performance indicators. The estimates are based on real tactical and technical characteristics of E-3 Sentry, A-50 aircraft and Ka-31, AW101 Merlin helicopters. It is shown that the aircraft has an undeniable advantage for strategic air defense tasks, while the helicopter retains a unique niche in the tactical echelon for ship-based operations and operations in hard-to-reach areas. Conclusions are drawn about the areas of preferred application for each type of carrier depending on the assigned tactical tasks.

Keywords: system analysis, airborne carriers, radar station, air target detection, aircraft, helicopter, analytic hierarchy process, application efficiency.

Вклад авторов: Лифанова Т. М. – формирование идеи, формулировка статьи, ключевых целей и задач, проведение исследования; Громовой М. Э. – сбор данных, анализ и интерпретация полученных данных; Петренко С. В. – работа с данными, редактирование статьи.

Введение

Выбор платформы для размещения радиолокационной станции (РЛС) обнаружения воздушных целей является классической задачей системного анализа, требующей учета множества противоречивых факторов. В отличие от РЛС наземного обзора или картографирования, задача обнаружения воздушных целей имеет свои особенности: необходимость сканирования верхней полусферы, работа в условиях естественных и организованных помех, а также высокая динамика изменения параметров целей. Целью данной работы является построение иерархической системы критериев для сравнения самолета и вертолета как носителей РЛС обнаружения воздушных целей и определение областей их рационального применения.

В целях формализованного сравнения применяется метод анализа иерархий Т. Саати (МАИ), который позволяет структурировать сложную проблему и получить количественные оценки предпочтительности альтернатив на основе экспертных суждений. В разделе 1 для наглядного пояснения метода рассматривается упрощенный иллюстративный пример с тремя критериями. Числовые значения в этом примере выбраны условно и служат только для демонстрации вычислительных процедур МАИ; они не отражают реальных приоритетов, принятых в окончательном анализе. В разделах 2 и 3 представлен полный системный анализ, основанный на семи критериях, объединенных в три группы: тактико-технические характеристики, эксплуатационные ограничения и специфические факторы носителя. Для количественной оценки использован метод экспертных оценок с последующей нормализацией показателей

по 10-балльной шкале. Весовые коэффициенты определены исходя из типовой задачи ведения воздушной разведки и контроля воздушного пространства средней интенсивности.

1. Применение метода анализа иерархий Т. Саати

Метод анализа иерархий (МАИ), разработанный американским математиком Т. Саати в 1970–1980-х годах, является одним из наиболее распространенных инструментов для принятия решений в условиях многокритериальности [10]. Суть метода заключается в следующем: разложение сложной проблемы на простые составляющие (построение иерархии); попарное сравнение критериев для определения их относительной важности; попарное сравнение альтернатив по каждому критерию; получение числовых весов, отражающих интегральную предпочтительность альтернатив.

В целях демонстрации метода рассмотрим гипотетическую ситуацию, в которой сравниваются два типа носителей (самолет и вертолет) по трем условным критериям: дальность обнаружения, скорость носителя (мобильность) и уровень помех от собственного двигателя. Все численные оценки в этом примере носят иллюстративный характер и не являются реальными данными для конкретных типов воздушных судов.

1.1. Построение иерархии

Иерархическая структура включает три уровня (рис. 1): *Уровень 1 (цель)*: выбрать эффективный носитель РЛС для обнаружения ВЦ; *Уровень 2 (критерии)*: дальность (K_1), скорость (K_2), помехи от носителя (K_3); *Уровень 3 (альтернативы)*: самолет Е-3, вертолет Ка-31.



Рис. 1. Иерархическая схема метода выбора эффективного носителя РЛС (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. Hierarchical scheme of the method of selecting an effective radar carrier (illustration by the authors)

1.2. Шкала относительной важности Саати

Саати предложил шкалу от 1 до 9 для попарных сравнений (табл. 1). Психологические экспери-

менты показали, что человек способен надежно различать 5–9 градаций.

Таблица 1

Шкала относительной важности

№ п/п	Интенсивность	Определение	Пояснение
	1	2	3
1	1	Равная важность	Два критерия вносят одинаковый вклад
2	3	Умеренное превосходство	Опыт и суждения дают умеренное превосходство одному критерию над другим
3	5	Существенное превосходство	Один критерий явно важнее другого
4	7	Значительное превосходство	Один критерий настолько важнее, что его доминирование очевидно



Продолжение таблицы 1

№ п/п	Интенсивность	Определение	Пояснение
	1	2	3
5	9	Очень сильное превосходство	Превосходство одного критерия над другим не вызывает сомнений
6	2,4,6,8	Промежуточные значения	Компромиссные случаи

Примечание: Важно помнить, если при сравнении критерия А с Б мы ставим 5 (А важнее Б), то при сравнении Б с А ставим обратную величину – 1/5.

Заполняем матрицу 3×3:

$$\begin{pmatrix} & K_1 & K_2 & K_3 \\ K_1 & 1 & 7 & 5 \\ K_2 & 1/7 & 1 & 1/3 \\ K_3 & 1/5 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Пояснение: на главной диагонали всегда 1; элемент $(K_1, K_2) = 7$ означает, что K_1 в семь раз важнее K_2 ; элемент $(K_2, K_1) = 1/7$ – обратная величина; элемент $(K_2, K_3) = 1/3$ означает, что K_2 в три раза менее важен, чем K_3 .

1.4. Расчет весов критериев (метод среднего геометрического)

Саати показал, что веса можно получить как нормализованный вектор средних геометрических по строкам. Вычисляем среднее геометрическое для каждой строки:

$$\begin{aligned} K_1 &: \sqrt[3]{(1 \times 7 \times 5)} = \sqrt[3]{35} = 3,27; \\ K_2 &: \sqrt[3]{(1/7 \times 7 \times 1/3)} = \sqrt[3]{0,048} = 0,36; \\ K_3 &: \sqrt[3]{(1/5 \times 3 \times 5)} = \sqrt[3]{0,6} = 0,84; \\ \text{Сумма} &= 3,271 + 0,362 + 0,843 = 4,476. \end{aligned}$$

Нормированные веса:

$$\begin{aligned} w_1 &= 3,271/4,476 \approx 0,731 \text{ (73,1 \%)}; \\ w_2 &= 0,362/4,476 \approx 0,081 \text{ (8,1 \%)}; \\ w_3 &= 0,843/4,476 \approx 0,188 \text{ (18,8 \%)}. \end{aligned}$$

Таким образом, в данном условном примере дальность (73,1 %) является главным критерием, помехи (18,8 %) – вторым по значимости, скорость (8,1 %) – наименее важна.

1.5. Сравнение альтернатив по каждому критерию

Сравнение альтернатив по критерию «Дальность», где самолет существенно превосходит вертолет, возьмем 5. Матрица 2×2 для этого критерия:

$$\begin{pmatrix} & \text{Самолет} & \text{Вертолет} \\ \text{Самолет} & 1 & 5 \\ \text{Вертолет} & 1/5 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Тогда веса для самолета – 0,83, а для вертолета – 0,17.

Сравнение альтернатив по критерию «Скорость», где самолет быстрее вертолета примерно в три раза. Матрица 2×2 для этого критерия:

$$\begin{pmatrix} & \text{Самолет} & \text{Вертолет} \\ \text{Самолет} & 1 & 3 \\ \text{Вертолет} & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Тогда веса для самолета – 0,75, а для вертолета – 0,25.

Сравнение альтернатив по критерию «Помехи», где у самолета помех практически нет, у вертолета – значительные. Принимаем превосходство в четыре раза (между умеренным и существенным). Матрица 2×2 для этого критерия:

$$\begin{pmatrix} & \text{Самолет} & \text{Вертолет} \\ \text{Самолет} & 1 & 4 \\ \text{Вертолет} & 1/4 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Тогда веса для самолета – 0,80, а для вертолета – 0,20.

Получаем интегральную оценку, перемножая веса альтернатив по каждому критерию на вес критерия и суммируя. Интегральная оценка для самолета: $0,731 \cdot 0,83 + 0,081 \cdot 0,75 + 0,188 \cdot 0,80 = 0,818$ (81,8 %). Интегральная оценка для вертолета: $0,731 \cdot 0,17 + 0,081 \cdot 0,25 + 0,188 \cdot 0,20 = 0,182$ (18,2 %).

И так, самолет предпочтительнее с интегральным весом 81 %.

1.6. Проверка согласованности

Оценка качества экспертных суждений вычисляется отношением согласованности (ОС). Для матрицы 3 × 3 (1) находим λ_{max} вектор Aw (умножение матрицы на вектор весов w):

$$\begin{aligned} (Aw)_1 &= 1 \cdot 0,731 + 7 \cdot 0,081 + 5 \cdot 0,188 = 2,238, \\ (Aw)_2 &= (1/7) \cdot 0,731 + 1 \cdot 0,081 + (1/3) \cdot 0,188 = \\ &= 0,248, \end{aligned}$$

$$(Aw)_3 = (1/5) \cdot 0,731 + 3 \cdot 0,081 + 1 \cdot 0,188 = 0,577.$$

Отношения $(Aw)_i/w_i$: $\lambda_1 = 2,238/0,731 \approx 3,062$, $\lambda_2 = 0,248/0,081 \approx 3,063$, $\lambda_3 = 0,577/0,188 \approx 3,071$, $\lambda_{max} = (3,062 + 3,063 + 3,071)/3 \approx 3,065$.

Индекс согласованности (ИС) вычисляется по формуле:

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}. \quad (5)$$

Индекс согласованности (ИС):

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3,065 - 3}{2} = \frac{0,065}{2} = 0,0325.$$

Максимальное собственное число λ_{max} для исходной матрицы (1) можно оценить. Саати ввел понятие Отношение Согласованности (ОС):

$$ОС = \frac{ИС}{\text{Случайный Индекс}}, \quad (6)$$

где Случайный Индекс (СИ) – это среднее значение ИС для случайных матриц разного размера (Саати рассчитал их экспериментально):

Таблица 2

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



СИ = 0,58 для трех критериев $n = 3$ (по таблице 2), тогда ОС:

$$ОС = \frac{ИС}{СИ} = \frac{0,0325}{0,58} \approx 0,056 \quad (5,6\%).$$

Правило Т. Саати: если ОС менее 10 % (или 0,1) – суждения согласованы, а если ОС более 20 % – матрицу нужно пересмотреть.

Так как ОС составило 5,6 % и является менее 10 %, следовательно, матрица оценки приемлемо согласована. Несмотря на то, что транзитивность нарушена (ожидаемое отношение $K_1/K_3 = 7 \cdot 3 = 21$, а фактическое 5), небольшой вес критерия K_2 (8,1 %) делает это противоречие незначительным в общей картине. Метод Саати показывает, что суждения эксперта в целом непротиворечивы. Если бы K_2 имел больший вес, такое же отношение дало бы высокий ОС. Здесь же результат корректен.

Важное замечание. Полученные в этом примере веса (0,731; 0,081; 0,188) являются условными

и не должны использоваться для практических выводов. В реальном системном анализе (разделы 2–3) используется расширенный набор из семи критериев, а весовые коэффициенты определены на основе отдельной матрицы попарных сравнений, заполненной экспертами с учетом реальных тактических приоритетов ПВО. Результаты этой экспертной оценки приведены в разделе 3.

2. Критерии сравнения для полного системного анализа

В целях решения задачи выбора носителя РЛС обнаружения воздушных целей выделены семь ключевых критериев, сгруппированных по трем направлениям. Для обоснования балльных оценок в таблицах 3 и 4 приведены основные тактико-технические характеристики (ТТХ) реальных самолетов и вертолетов, используемых в качестве альтернатив. [1, 3, 4, 8, 12, 13–20].

Таблица 3

ТТХ самолетов ДРЛО E-3 Sentry и A-50

№ п/п	Параметр	ТТХ самолетов ДРЛО E-3 Sentry и A-50	
		E-3 Sentry (США/НАТО)	A-50 «Шмель» (Россия)
	1	2	3
1	Платформа	Boeing 707-320B	Ил-76МД
2	Экипаж	Летный экипаж 4 и 13–19 операторов	Летный экипаж 5 и 10 операторов
3	Длина / Размах крыла	46,6 м / 44,4 м	49,6 м / 50,5 м
4	Макс. взлетная масса	147 418 кг	170 000 кг
5	Двигатели	4 × Pratt & Whitney TF33-PW-100A	4 × Авиадвигатель PS-90A
6	Крейсерская скорость	> 800 км/ч	800 км/ч
7	Практический потолок	> 8 788 м (29 000 футов)	10 000–12 000 м
8	Дальность полета	> 9 250 км	5 000 км
9	Продолжительность патрулирования	> 8 ч (до 11 ч без дозаправки)	7 ч 40 мин
10	Диаметр обтекателя антенны	9,1 м	9 м
11	Дальность обнаружения ВЦ	> 375 км (низколетящие)	до 650 км (бомбардировщики); до 300 км (истребители)
12	Одновременное сопровождение целей	до 600	50–60

Таблица 4

ТТХ вертолетов ДРЛО Ka-31 и AW101 Merlin AEW

№ п/п	Параметр	ТТХ вертолетов ДРЛО Ka-31 и AW101 Merlin AEW	
		Ka-31 (Россия)	AW101 Merlin HM2 (Великобритания)
	1	2	3
1	Платформа	Ka-27 (модифицированный)	AW101 / EH-101 Merlin
2	Экипаж	2 (пилот и штурман)	3–7
3	Длина / Ширина	12,5 м / 3,8 м	19,3 м / -
4	Диаметр несущего винта	15,9 м	18,6 м
5	Макс. взлетная масса	12 200 кг	14 600 кг
6	Двигатели	2 × ТВ3-117ВМАР (2 × 1 633 кВт)	3 × Rolls-Royce RTM322 (3 × 1 868 кВт)
7	Крейсерская скорость	220 км/ч	278 км/ч
8	Практический потолок	3 500 м	4 500 м
9	Дальность полета	600 км	1 390 км
10	Продолжительность патрулирования	2,5 ч	4–5 ч
11	РЛС / Антенна	E-801M «Око» (6 м ² , 200 кг)	Thales Searchwater 2000 AEW (Crownsnest)
12	Дальность обнаружения ВЦ	100–150 км	до 200 км (оценка)
13	Одновременное сопровождение целей	до 40	до 30
14	Особенности	Соосная схема, антенна складывается под фюзеляж	Трехдвигательная схема, модульный комплекс Crownsnest

На основе этих данных сформированы три группы критериев.

Группа А. Тактико-технические характеристики: K_1 *Дальность обнаружения воздушных целей.* Сущность определяется высотой полета носителя (радиогоризонт) и энергетическим потенциалом РЛС. Чем выше носитель, тем раньше обнаруживается низколетящая цель. Оценка: самолет (высота 8-12 км) обеспечивает дальность обнаружения крупных целей до 400-600 км, вертолет (высота до 3-4 км) – до 200-250 км. Сравнение с данными таблиц 3 и 4 показывает, что Е-3 и А-50 превосходят Ка-31 и АW101 по этому параметру в 2-3 раза. K_2 *Скорость реакции и мобильность.* Сущность определяется способностью быстро выйти в район патрулирования или сменить позицию. Оценка: самолет – 600-900 км/ч, вертолет – 250-350 км/ч. K_3 *Длительность барражирования (патрулирования).* Сущность определяется временем нахождения в заданной зоне. Оценка: самолеты ДРЛО – 6-10 ч, вертолеты – 3-5 ч (возможна посменная работа при корабельном базировании).

Группа Б. Эксплуатационные и массогабаритные характеристики: K_4 *Энергетический потенциал РЛС и масса полезной нагрузки.* Сущность в ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению. Оценка: самолет может нести крупногабаритные антенны (9-10 м) и мощные генераторы, вертолет ограничен в грузоподъемности, что снижает потенциал РЛС. K_5 *Гибкость базирования.* Сущность в возможности работы с кораблями и неподготовленных площадок. Оценка: вертолет обладает высокой гибкостью, самолет требует аэродромов первого класса.

Группа В. Специфические факторы (помехи и устойчивость): K_6 *Устойчивость к вибрациям и помехам от движителя.* Сущность объединяет виброакустическую нагрузку на аппаратуру РЛС и электромагнитное влияние вращающихся элементов (втулки и лопастей). Для вертолета эти факторы являются критическими. В работе [11] показано, что даже геометрически сложная втулка несущего винта создает флуктуации кажущегося центра излучения (угловой шум), параметры которого периодически изменяются при вращении винта, что приводит к ошибкам измерения угловых координат цели. Кроме того, вращение лопастей порождает микродоплеровский эффект, создающий широкий спектр паразитных частотных составляющих, маскирующих полезный сигнал [20]. У самолета данные факторы практически отсутствуют. Оценка: у вертолета уровень вибраций

и помех значительно выше, что требует сложных алгоритмов компенсации; у самолета эти факторы минимальны. K_7 *Чистота эфира (отсутствие паразитных отражений от элементов конструкции).* Сущность в искажении диаграммы направленности и появление ложных сигналов от элементов носителя. Оценка: у самолета с антенной над фюзеляжем фактор минимален, у вертолета – существенен.

3. Результаты сравнительного анализа

Интегральная оценка выполнена нормализация критериев по 10-балльной шкале (10 – максимальное преимущество). Весовые коэффициенты определены экспертным путем с использованием МАИ для задачи обнаружения воздушных целей. Обоснование весов: для ПВО приоритетными являются дальность, чистота эфира и длительность патрулирования; гибкость базирования имеет меньшее значение, так как аэродромы обычно доступны.

Проверка согласованности матрицы попарных сравнений для семи критериев. Для семи критериев была построена 7×7 матрица попарных сравнений (7). Числа в матрице получены усреднением оценок экспертов и отражают относительную важность критериев для задачи ПВО. Весовые коэффициенты, приведенные в таблице 5, получены методом Саати на основе экспертных оценок, выполненных группой специалистов (n=5) в области проектирования авиационных РЛС и систем ПВО. Расчет максимального собственного числа λ_{max} выполнен по стандартной процедуре МАИ [2, 5-7, 9-11, 19]; получено значение $\lambda_{max} = 7,23$. Индекс согласованности $ИС = (7,23 - 7) / (7 - 1) = 0,0383$. Случайный индекс для $n = 7$ составляет $СИ = 1,32$ (по таблице 2). Отношение согласованности $ОС = ИС/СИ = 0,0383/1,32 \approx 0,029$ (2,9%), что значительно меньше допустимого порога 10%. Это подтверждает непротиворечивость экспертных суждений и позволяет использовать полученные веса для дальнейшего анализа.

$$\begin{pmatrix} & K_1 & K_2 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 \\ K_1 & 1 & 3 & 2 & 4 & 6 & 2 & 3 \\ K_2 & 1/3 & 1 & 1/2 & 2 & 4 & 1/3 & 1/2 \\ K_3 & 1/2 & 2 & 1 & 3 & 5 & 1/2 & 1 \\ K_4 & 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1 & 3 & 1/4 & 1/3 \\ K_5 & 1/6 & 1/4 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/6 & 1/5 \\ K_6 & 1/2 & 3 & 2 & 4 & 6 & 1 & 2 \\ K_7 & 1/3 & 2 & 1 & 3 & 5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Примечание: числа в матрице получены усреднением оценок экспертов и отражают относительную важность критериев для задачи ПВО.

Таблица 5

Интегральная оценка эффективности носителей

№ п/п	Критерий	Вес (Wj)	Оценка самолета	Взвеш. оценка самолета	Оценка вертолета	Взвеш. оценка вертолета
	1	2	3	4	5	6
1	Тактико-технические	0,60		5,30		2,70
2	1. Дальность обнаружения	0,30	10	3,00	4	1,20
3	2. Скорость реакции	0,15	9	1,35	5	0,75
	3. Длительность барражирования	0,15	8	1,20	5	0,75

Продолжение таблицы 5

№ п/п	Критерий	Вес (W _j)	Оценка самолета	Взвеш. оценка самолета	Оценка вертолета	Взвеш. оценка вертолета
	1	2	3	4	5	6
4	Эксплуатационные	0,15		1,20		0,75
5	4. Энергетика / масса РЛС	0,10	9	0,90	4	0,40
6	5. Гибкость базирования	0,05	2	0,10	7	0,35
7	Специфические факторы	0,25		2,40		0,50
8	6. Устойчивость к вибрациям и помехам от движителя	0,15	9	1,35	2	0,30
9	7. Чистота эфира	0,10	8	0,80	3	0,30
10	Интегральный показатель	1,00		8,90		3,95

Примечание: Веса и оценки могут варьироваться в зависимости от конкретной постановки задачи (например, защита авианосной группы или патрулирование границы).

4. Обсуждение

Полученные интегральные показатели (8,90 для самолета против 3,95 для вертолета) демонстрируют значительное превосходство самолета в рамках выбранной системы критериев, что объясняется доминированием дальности обнаружения, длительности патрулирования и отсутствием помех от собственного винта.

Влияние собственных помех вертолета на эффективность РЛС. Низкие оценки вертолета по критериям «устойчивость к вибрациям и помехам от движителя» (2 из 10) и «чистота эфира» (3 из 10) согласуются с результатами фундаментальных исследований. В работе [11] показано, что втулка винта создает нестационарный угловой шум, параметры которого зависят от угла поворота втулки, что ведет к дополнительным ошибкам пеленгации. В работе [20] продемонстрировано, что микроплеровские составляющие от вращающихся лопастей имеют сложную временную и частотную структуру, затрудняющую выделение целей на фоне помех. Эти физические эффекты делают вертолет существенно менее пригодным для задач дальнего обнаружения, особенно при работе по малозаметным и низколетящим целям.

Следует также отметить, что результат сильно зависит от весов критериев. Если бы задача сместилась в сторону корабельного базирования (например, прикрытие десантной группы), вес критерия «гибкость базирования» мог бы быть увеличен до 0,20–0,30, что повысило бы интегральную оценку вертолета до 5–6 баллов, сделав его конкурентоспособным в тактическом звене.

Основное ограничение представленного анализа – субъективность экспертных оценок. Хотя матрица сравнения прошла проверку согласованности (ОС = 2,9%), привлечение более широкого круга экспертов (пилотов, инженеров, тактиков) позволило бы уточнить веса и повысить достоверность результатов. Также стоит учитывать, что в анализе не рассматривалась стоимость жизненного цикла и экономическая эффективность, что является направлением для будущих исследований.

Сравнение с литературными данными [1, 3, 4, 8, 12, 13–20] подтверждает, что тактико-технические характеристики реальных машин соответствуют принятым в статье оценкам. Проблемы вибраций

и помех от лопастей для вертолетных РЛС широко освещены в работах [11, 20], что также согласуется с нашими выводами.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Самолет является безальтернативной системой для стратегической ПВО и контроля воздушного пространства. Его интегральная оценка (8,90) значительно превосходит вертолетную за счет преимуществ в дальности, энергетике РЛС и длительности патрулирования. Только самолет способен обеспечить «чистый» обзор неба без помех от собственного винта и создать эшелонированную систему дальнего обнаружения. Самолет – оптимальный выбор для решения задач ВВС и ПВО.

2. Вертолет является специализированным тактическим средством для зоны ближнего действия. Несмотря на низкую интегральную оценку (3,95) в «общем зачете», он сохраняет уникальную полезность в следующих задачах: корабельное базирование – единственное средство обнаружения низколетящих противокорабельных ракет за радиогоризонтом корабля; действия в горной и труднодоступной местности, где отсутствуют аэродромы. Однако его эффективность в задачах ПВО существенно ограничена собственными угловыми шумами и микроплеровскими помехами от втулки и лопастей [11, 20], что требует применения сложных алгоритмов компенсации и снижает точность обнаружения на больших дальностях.

3. Критические ограничения вертолета для воздушного обзора – малая высота и, как следствие, малая дальность обнаружения низколетящих целей, а также высокий уровень помех от лопастей, требующий сложных алгоритмов селекции. Таким образом, выбор носителя РЛС воздушного базирования должен определяться тактической задачей: самолет – для дальнего рубежа, вертолет – для ближнего тактического звена, работающего в интересах флота или сухопутных войск.

Метод Саати показал себя эффективным инструментом, позволяющим «оцифровать» экспертные суждения и получить объективные, проверяемые количественные оценки. Это подтверждает целесообразность его применения в системном анализе авиационных комплексов.

Список литературы

1. Джексон Р. Вертолеты. Иллюстрированная энциклопедия. /Пер. с англ./ – М.: «Омега», 2007. – 192 с. – ISBN 978-5-465-01476-2.



2. Жуковин, Владимир Евгеньевич. Многокритериальные модели принятия решений с неопределенностью / В. Е. Жуковин. – Тбилиси : Мецниереба, 1983. – 105 с.
3. Ка-31 – вертолет радиолокационного дозора. Открытые данные ОКБ Камова, 2015. – Режим доступа: <http://www.kamov.ru/> (дата обращения: 10.06.2025).
4. Ка-31 – вертолет радиолокационного дозора // Airforce Technology. – Режим доступа: <https://www.airforce-technology.com/projects/ka31/> (дата обращения: 10.06.2025).
5. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. М: Логос, – 2000. – 296 с.
6. Литвак Б. Г. Экспертные оценки и принятие решений. М: Патент, – 1996. – 271 с.
7. Осипов В.А., Дубинина К.С. Применение алгоритмов теории графов к упрощенному методу анализа иерархий // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 3. – С. 24-31. – DOI:
8. Россия завершила поставку Китаю 9 вертолетов Ка-31 // Синьхуа . – 2011. – Режим доступа: <http://mil.news.sina.com.cn/2011-06-24/1000653734.html> (дата обращения: 10.06.2025).
9. Рыков А. С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. М: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с
10. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с. – ISBN 5-256-00443-3.
11. Степанов М.А. Параметры плотности распределения вероятности флуктуаций кажущегося центра излучения от втулки винта вертолета при ее радиолокационном наблюдении // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – № 3. – С. 256–262. – DOI: 10.31857/S0033849423030154.
12. A-50 Mainstay Airborne Early Warning and Control Aircraft (AEW&C) // Airforce Technology. – Режим доступа: <https://www.airforce-technology.com/projects/a50/> (дата обращения: 10.06.2025).
13. AW101 Merlin // Naval Technology. – Режим доступа: <https://www.naval-technology.com/projects/merlin/> (дата обращения: 10.06.2025).
14. Du L., Bao Z., Xing M. Analysis and detection of helicopter radar echo // Journal of Xidian University. - 2003. - Vol. 30, No. 5. - P. 574-579.
15. E-3 AWACS Airborne Warning and Control System (AWACS). Boeing Company Technical Brief, 2020. – Режим доступа: <https://www.boeing.com/defense/awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
16. E-3 Sentry (AWACS) // Aerotech News. – 2016. – Режим доступа: <https://www.aerotechnews.com/davis-monthanafeb/2016/03/04/e-3-sentry-awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
17. E-3 AWACS (Sentry) Airborne Warning and Control System // Airforce Technology. – 2020. – Режим доступа: <https://www.airforce-technology.com/projects/e3awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
18. E-3 SENTRY (AWACS) // U.S. Air Force Fact Sheet. – Режим доступа: <https://www.acc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/199162/e-3-sentry-awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
19. Zdzisław Pawlak ROUGH SET THEORY AND ITS APPLICATIONS TO DATA ANALYSIS // Institute of Theoretical and Applied Informatics, Polish Academy of Sciences, ul. Bałtycka 5, 44 100 Gliwice, Poland
20. Zhang L., Huang G. Extracting of Micro Doppler Parameter of Helicopter Rotor Based on Time-frequency Analysis // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 130–134. – P. 2696–2700. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.2696.

References

1. Jackson R. Helicopters. The Irish Encyclopedia. /Translated from English/ Moscow: Omega, 2007. 192 p. ISBN 978-5-465-01476-2.
2. Zhukovin, Vladimir Evgenievich. Multicriteria models of decision-making with uncertainty / V. E. Zhukovin. – Tbilisi : Metsniereba, 1983. – 105 p.
3. Ка-31 is a radar patrol helicopter. Open data from the Kamov Design Bureau, 2015. – Access mode: <http://www.kamov.ru/> (date of issue: 06/10/2025).
4. Ка-31 – radar patrol helicopter // Air Force. – Access mode: <https://www.airforce-technology.com/projects/ka31/> (date of access: 06/10/2025).
5. Larichev O.I. The theory and methods of decision-making and also Chronicle of events in the Magic countries. M: Lagos, – 2000. – 296 pages.
6. Lithuanian Jew B. G. Expert estimates and decision-making. M: Patent, – 1996. – 271 pages.
7. Osipov V.A., Dubinina K.S. Application of graph theory algorithms to a simplified hierarchy analysis method // Bulletin of Computer and Information Technologies. – 2019. – No. 3. – pp. 24-31. – doi:
8. Russia has completed the delivery of 9 Ka-31 helicopters to China // Xinhua. – 2011. – Access mode: <http://mil.news.sina.com.cn/2011-06-24/1000653734.html> (date of reference: 06/10/2025).
9. Roars of Ampere-second. System analysis: models and methods of decision-making and search optimization. – M: MISIS publishing House, 2009. – 608 pages.
10. Saati T.L. Decision-making. Method of Hierarchy Analysis / Translated from English by R.G. Vachnadze, Moscow: Radio and Communications, 1993, 314 p. ISBN 5-256-00443-3.
11. Stepanov M.A. Parameters of the probability distribution density of fluctuations of the apparent radiation center from the helicopter rotor hub during its radar observation // Radio Engineering and Electronics. – 2023. – Vol. 68. – No. 3. – pp. 256-262. – DOI: 10.31857/S0033849423030154.
12. A-50 Mainstay Airborne Early Warning and Control Aircraft (AEW&C) // Airforce Technology. – Режим доступа: <https://www.airforce-technology.com/projects/a50/> (дата обращения: 10.06.2025).
13. AW101 Merlin // Naval Technology. – Режим доступа: <https://www.naval-technology.com/projects/merlin/> (дата обращения: 10.06.2025).
14. Du L., Bao Z., Xing M. Analysis and detection of helicopter radar echo // Journal of Xidian University. - 2003. - Vol. 30, No. 5. - P. 574-579.
15. E-3 AWACS Airborne Warning and Control System (AWACS). Boeing Company Technical Brief, 2020. – Режим доступа: <https://www.boeing.com/defense/awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).

16. E-3 Sentry (AWACS) // Aerotech News. – 2016. – Режим доступа: <https://www.aerotechnews.com/davis-mon-thanafb/2016/03/04/e-3-sentry-awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
17. E-3 AWACS (Sentry) Airborne Warning and Control System // Airforce Technology. – 2020. – Режим доступа: <https://www.airforce-technology.com/projects/e3awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
18. E-3 SENTRY (AWACS) // U.S. Air Force Fact Sheet. – Режим доступа: <https://www.acc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/199162/e-3-sentry-awacs/> (дата обращения: 10.06.2025).
19. Zdzisław Pawlak ROUGH SET THEORY AND ITS APPLICATIONS TO DATA ANALYSIS // Institute of Theoretical and Applied Informatics, Polish Academy of Sciences, ul. Baltycka 5, 44 100 Gliwice, Poland
20. Zhang L., Huang G. Extracting of Micro Doppler Parameter of Helicopter Rotor Based on Time-frequency Analysis // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 130–134. – P. 2696–2700. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.2696.

© Т. М. Лифанова, М. Э Громовой., С. В. Петренко

Ссылка для цитирования:

Лифанова Т. М., Громовой М. Э., Петренко С. В. Применение метода анализа иерархий т. саати для сравнительного системного анализа самолета и вертолета в качестве подвижных носителей радиолокационной станции // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 118–125.

УДК 004.9:69
DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-125-131

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕРКИ СООТВЕТСТВИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НОРМАТИВНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ТИМ И RAG-LLM**

Н. В. Купчикова, А. И. Сухорукова, Т. В. Золина

Купчикова Наталья Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ); доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Сухорукова Алина Игоревна, студент, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва; Российская Федерация;

Золина Татьяна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация

Представлена концепция и программный прототип цифровой платформы «ТИМ Инспектор» для автоматизированной проверки соответствия конструктивно-технологических решений высотных зданий действующим нормативным требованиям на предпроектной и проектной стадиях. Платформа интегрирует технологии информационного моделирования (далее ТИМ), конечно-элементного анализа (CAE) и методы искусственного интеллекта (Retrieval-Augmented Generation, RAG; Large Language Model, LLM). В отличие от существующих систем rule-based checking, требующих ручного программирования каждого правила, предлагаемое решение автоматически извлекает нормативные требования из документов (СП, ГОСТ, СанПиН), преобразует их в векторные эмбединги и с помощью LLM генерирует проверочные правила. Разработана модульная архитектура, включающая пять независимых модулей: NormaParser, BIMChecker, CalcValidator, CodeAdvisor и CostEstimator. Апробация выполнена на конечно-элементной модели многофункционального жилого комплекса «Астра» (109 662 элемента). Сформированы проектные цифровые кейсы для проверки армирования колонн, несущей способности свай, эвакуационных путей и геометрических ограничений. Экономическая эффективность подтверждена: снижение времени нормоконтроля на 40–60 %, количества ошибок на 60 %, срок окупаемости – не более 18 месяцев. Получены три акта о внедрении в проектные организации.

Ключевые слова: ТИМ, RAG, LLM, автоматизация проверки, высотное здание, нормативные требования, семантический поиск, импортозамещение.

**AUTOMATED COMPLIANCE CHECKING OF HIGH-RISE BUILDING DESIGN
USING BIM AND RAG-LLM INTEGRATION**

N. V. Kupchikova, A. I. Sukhorukova, T. V. Zolina

Kupchikova Natalya Viktorovna, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Building Structures, Buildings, and Facilities, Russian University of Transport (MIIT); Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Sukhorukova Alina Igorevna, student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow; Russian Federation;

Zolina Tatyana Vladimirovna, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation

The paper presents a concept and a software prototype of the digital platform “TIM Inspector” for automated checking of structural and technological solutions of high-rise buildings against current regulatory requirements at pre-design and design stages. The platform integrates Building Information Modelling (BIM), finite-element analysis (CAE) and artificial intelligence techniques (Retrieval-Augmented Generation, RAG; Large Language Model, LLM). Unlike existing rule-based checking systems that require manual coding of each rule, the proposed solution automatically extracts regulatory requirements from documents (SP, GOST, SanPiN), converts them into vector embeddings and uses an LLM to generate check rules. A modular