

## Раздел II. Анализ данных, моделирование и управление

УДК 681.142

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-47-58

**А.А. Белевцев, А.М. Белевцев, В.А. Бальбердин**

### **АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ПРИОРИТЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ В УСЛОВИЯХ СВЯЗНОСТИ КРИТЕРИЕВ И ТЕХНОЛОГИЙ**

*В настоящее время значительное внимание в развитых зарубежных странах уделяется вопросам развития и использования в военной сфере концепции сетцентрического управления (СЦУ). Концепция определяет архитектуру системы проведения операций в виде взаимоувязанных в единую систему трёх видов сетевых структур: разведки и наблюдения, информационно-управляющей, средств поражения. Анализ показывает, что существенную роль в сетевой структуре разведки и наблюдения (называемой также сенсорной решеткой) играют радиолокационные системы и комплексы (РЛК). Отмечается, что в настоящее время значительные усилия предпринимаются в целях разработки качественно нового поколения РЛС на базе исследований по созданию новых технологий в таких областях, как нанoeлектроника, микро- и нанoeлектромеханическая техника (MEMS/NEMS), наносистемы, функциональные материалы и наноматериалы, построение больших информационных коммуникационных сетей. В этой связи вопросы прогнозирования направлений развития новых технологий создания перспективных радиолокационных систем и комплексов военного назначения приобретают существенный интерес. Рассматриваются вопросы повышения достоверности оценок при анализе технологических трендов и технологий на примере развития радиолокационных комплексов (РЛК) для систем СЦУ. В работе предложена процедура формирования иерархической системы критериев, проведен поэтапный анализ векторов приоритетов на примере создания и развития технологических трендов и технологий радиолокационной составляющей сенсорной решетки СЦУ. Было показано, что наличие взаимосвязей критериев и обратных связей в анализируемых технологических трендах приводит к существенным ошибкам: в определении значений векторов приоритетов и построении дорожных карт создания радиолокационной составляющей сенсорной решетки СЦУ. В результате установлено, что для повышения достоверности прогнозирования необходимо проводить оценку приоритетов в общей схеме развития технологических трендов и технологий на основе метода аналитических сетей.*

*Сетцентрическое управление; прогнозирование; сенсорная решетка; радиолокационные средства; технологические направления; метод анализа иерархий; метод аналитических сетей.*

**A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev, V.A. Balyberdin**

### **ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING BIG LANGUAGE MODELS FOR MONITORING TECHNOLOGICAL TRENDS AND DETERMINING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECH ENTERPRISES**

*In modern times some foreign countries pay a great attention at the development and using in military field the netcentric conception of control (NCC). The conception defines the architecture of operations as a composition of three network structures: reconnaissance, information control and destruction. The analyses made show that the great part in the network structure of reconnaissance play the radar systems and complexes (RSC). It is pointed out that at present the great efforts are made to realize a new quality RSC on the base of new technologies in nanoelectronics, MEMS/NEMS, nanomaterials, large information networks. That is why the predictions for ways to new technologies constructing of perspective RSC for military objectives is of great interest. The paper deals with some problems connected to the estimations certainty when technological trends and technologies are analyzed. The study is made on the example of radar complexes (RC) in NSS. The procedure for hierarchy criterions system forming is suggested, the bystages priority vector analyses are made on the example of technological trends and technologies developments for sensor greed of NSS. It has been known that the availability of the criterions*

*interrelations reciprocal of the technological trends can made errors for estimations constructed: in vectors priorities estimations; in roadcars constructing for radar part of NSS. It is recognized that to raise the certainty requires the priorities estimation in the common schematic for technological trends and technologies on the base of analytical networks method.*

*Netcentric conception of control; sensor greed; forecast; radar systems and complexes; technological trends; hierarchy analyses method; analytical networks method.*

**Введение.** В настоящее время значительное внимание в развитых зарубежных странах уделяется вопросам развития и использования в военной сфере концепции сетечетрического управления (СЦУ) [1–5]. Концепция определяет архитектуру системы проведения операций в виде взаимоувязанных в единую систему трёх видов сетевых структур: разведки и наблюдения, информационно-управляющей, средств поражения.

Анализ показывает, что существенную роль в сетевой структуре разведки и наблюдения (называемой также сенсорной решеткой) играют радиолокационные системы и комплексы (РЛК) [6–10].

В настоящее время в рамках перехода к шестому технологическому укладу значительные усилия в научно-техническом плане предпринимаются в целях разработки качественно нового поколения РЛК на базе исследований по созданию нового поколения технологий в таких областях, как:

- ◆ наноэлектроника;
- ◆ микро- и наноэлектромеханическая техника (MEMS/NEMS);
- ◆ наносистемы и функциональные материалы и наноматериалы;
- ◆ построение больших информационных коммуникационных сетей – глобального информационного пространства и др.

В этой связи вопросы стратегического анализа направлений развития новых технологий создания перспективных радиолокационных систем и комплексов военного назначения приобретают существенный интерес.

### **Основная часть**

#### *1. Постановка задачи*

Одной из основных проблем решения этой задачи является оценка приоритетов, которая обусловлена сложностью получения количественных оценок, взаимозависимостью критериев и наличием обратных связей в анализируемых структурах технологических трендов.

Решение задачи повышения достоверности оценки требует создания и развития новых подходов и методов, которые должны обеспечить:

- ◆ учет взаимной зависимости критериев и наличие обратных связей в анализируемых структурах технологических трендов;
- ◆ получение более корректных оценок согласованности рассматриваемых элементарных оценок, что позволит повысить достоверность интегральных оценок прогноза приоритетов технологических трендов.

#### *2. Критерии решения задачи*

Для заданного уровня анализа, необходимо учитывать общемировые тенденции развития экономики, которое характеризуются резким обострением конкуренции и борьбой за технологический суверенитет. В этой связи для решения поставленной задачи необходимо определение:

- ◆ технологических трендов объективного развития технологий в предметных областях и группах предметных областей;

а так же:

- ◆ технологических трендов развития науки и технологий, сформированных в рамках противодействия внешним угрозам на национальном уровне.

В этой связи для решения задачи необходима разработка трех групп критериев оценки приоритетов [6, 11].

В первую группу  $K1(U_i)$  войдет перечень критериев, сформированных на основе анализа угроз безопасности.

Первая группа критериев может быть сформирована на основе перечня угроз, которые вошли в военную доктрину РФ [12]:

- ◆ Угроза 1: Конфликт со страной, превосходящей Россию по уровню технологий. Война бесконтактным способом.
- ◆ Угроза 2: Конфликт с равной по потенциалу страной.
- ◆ Угроза 3: Локальные войны наподобие Афганистана и Сирии.
- ◆ Угроза 4: Противостояние терроризму.
- ◆ Угроза 5: Возможное обострение борьбы за ресурсы Арктики.

Во вторую группу  $K2(C_n^{Pm})$ , где  $n = \overline{1, N}$  – номера технологических трендов, войдет иерархическая система критериев для построения оценок на уровне технологических трендов.

Методические рекомендации по оформлению второй группы критериев рассмотрены в работе [1, 7].

Для оценки технологических направлений и технических систем (ТС) нового поколения целесообразно вводить следующие характеристики критериев [11, 9]:

- ◆ функциональные (тактические);
- ◆ технико-экономические.

Тактические характеристики определяют возможности целевого применения и области применения.

Технические характеристики определяют технические (технологические) средства, необходимые для обеспечения тактических параметров.

К технико-экономическим характеристикам следует отнести:

- ◆ масса-габаритные характеристики;
- ◆ характеристики энергопотребления;
- ◆ надежность;
- ◆ стоимость.

В третью группу  $K3(c_{ij}^n)$ , где  $i = \overline{1, I}$  – войдет система критериев для оценки приоритетов технологий  $c_{ij}^n$  технологического тренда  $C_n^{Pm}$ , на уровне отдельных технологий.

При этом в качестве критерия может быть выбран критерий  $K3(c_{ij}^n)$  – какая из сравниваемых технологий наиболее значима для реализации тренда.

### 3. Последовательность этапов решения задачи.

Решение поставленной задачи может быть получено на основе реализации процедуры, представленной в виде следующего уравнения логического вывода (1)

$$\begin{array}{ccccccc}
 O_i \rightarrow O_k (O_k \in O_i) \rightarrow P \rightarrow P_m(\max \rho_k^P) \rightarrow G_n^{Pm} \rightarrow \bar{\rho}_n^{Pm}(\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K), \bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ)) \rightarrow G_i^n \rightarrow \bar{\rho}_{ij}^{Pm}(c_{ij}^n) & & & & & & (1) \\
 \uparrow & \uparrow & \uparrow & & \uparrow & & \\
 K_1(y_i) & K_1(y_i) & K_2 & & K_3 & & 
 \end{array}$$

где  $O_i$  – область применения (СЦУ);

$O_k$  – РЛК сегмент области применения  $O_i$  (сенсорная решетка)  $O_k \in O_i$ ;

$P$  – группа предметных областей для сегмента  $O_k$  (РЛК);

$\rho_k^P = \{\rho_1 \dots \rho_k\}$  – вектор приоритетов для группы предметных областей  $P \in O_k$ ;

$P_m(\max \rho_k^P)$  – предметная область с максимальным значением вектора приоритетов по критерию  $K_1$ ;

$\bar{\rho}_n^{Pm}(\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K) \cup \bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ))$  – вектор приоритетов технологических трендов по критерию  $K_2$ ;

$C_n^{Pm}$  – технологические тренды предметной области  $P_m$  (БПЛА);

$G_n^{Pm} = \{c_{ij}^n\}$  – логический граф технологий тренда  $C_n^{Pm}$  предметной области  $P_m$ ;

$\{c_{ij}^n\}$  – технологии технологического тренда  $C_n^{Pm}$ ;

$\bar{\rho}_{ij}^{Pm}(c_{ij}^n)$  – вектор приоритетов технологий технологического тренда  $C_n^{Pm}$  для  $P_m$  по критерию  $K_3$ .

На первом этапе.

В соответствии с уравнением (1) и группой критериев  $K1(Y_i)$  осуществляется логический переход от  $O_i$  – область применения (СЦУ) к  $P$  – группа предметных областей для сегмента  $O_k$ .

На втором этапе.

На основании проведенного мониторинга сформировано множество направлений –  $P$  создания РЛК для БПЛА различных вариантов базирования, как сегмента  $O_k$  сенсорной решетки  $O_i$  СЦУ:

1. Космическое базирование.
2. Псевдоспутники – стратосферные беспилотные летательные аппараты (БПЛА).
3. Воздушное базирование.
4. Мобильные системы.
5. Операции в городских условиях.
6. Наземное базирование.

Можно положить, что в сформированной группе критериев  $K1(Y_i)$  все угрозы независимы. Тогда оценка интегральных значений вектора приоритетов для сегментов сенсорной решетки РЛК может быть получена на основе МАИ [11, 13, 14]. Результаты представлены на рис. 1.

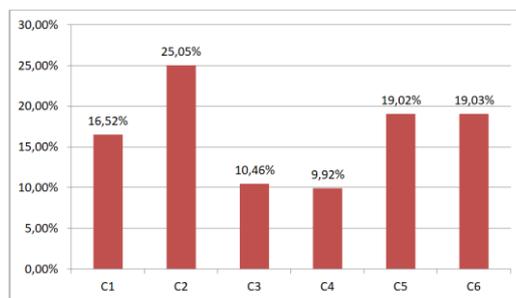


Рис. 1. Результаты анализа приоритетных направлений развития сегментов сенсорной решетки РЛК

На основании полученных результатов  $P_m(\max \rho_k^P)$  – максимальное значение вектора приоритетов получено для 5-го сегмента сенсорной решетки т.е. псевдоспутники или стратосферные БПЛА [12, 15–24].

Ключевое преимущество псевдо-спутников в том, что они берут лучшее от направлений 3 и 1:

- ◆ гибкость самолета (включая беспилотные дроны);
- ◆ надежность спутниковых систем.

Вместе с тем создание РЛК для данного сегмента требует нового технологического базиса в целях обеспечения высоких требований к массогабаритным характеристикам, высокой разрешающей способности, системе энергоснабжения и другим характеристикам.

На третьем этапе.

На основании проведенного мониторинга для предметной области  $P_m(\max \rho_k^P)$  – с максимальным значением вектора приоритетов сформированы пять технологических трендов  $C_n^{Pm}$ , для которых определены технологии  $C_j^P$  табл. 1.

$C_1^{Pm}$  – технологии создания многофункциональных композиционных наноматериалов.

$C_2^{Pm}$  – технологии управления теплом.

$C_3^{Pm}$  – технологии создания быстродействующей компонентной базы.

$C_4^{Pm}$  – технологии генерации и хранения энергии.

$C_5^{Pm}$  – технологии интеграции СВЧ электронных компонентов.

В соответствии с уравнением логического вывода (1) проводим структуризацию технологических трендов. Логический граф  $G_n^{Pm}$  для рассматриваемого варианта представлен на рис. 2.

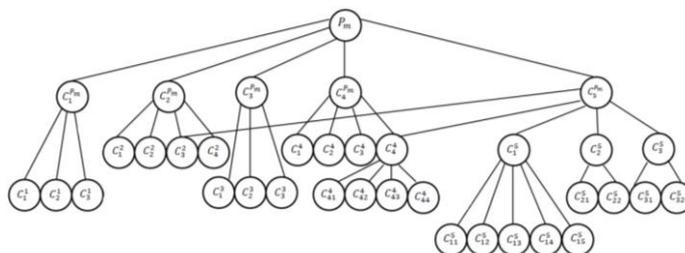


Рис. 2. Логический граф  $G_n^{P_m}$  технологических трендов и технологий

Таблица 1

Приоритеты технологии  $c_{ij}^n$  тренда  $C_n^{P_m}$  предметной области  $P_m$ .

		Наименование технологии	$\bar{P}_n^{P_m}(\Phi K)$	$\bar{P}_n^{P_m}(TЭ)$	
			$\rho_{ij}^{P_m}$	$\rho_{ij}^{P_m}$	
$C_1^{P_m}$	$C_1^1$	Технологии создания радиочастотных наноматериалов	0,005	0,011	
	$C_2^1$	Технологии создания размеростабильных композиционных наноматериалов УНТ	0,034	0,075	
	$C_3^1$	Технологии создания метоматериалов	0,011	0,024	
$C_2^{P_m}$	$C_1^2$	Теплоконтроль в кристалле	0,028	0,021	
	$C_2^2$	Теплоотвод с чипа	0,018	0,013	
	$C_3^2$	Теплоотвод со схемы	0,065	0,49	
	$C_4^2$	Теплоотвод с узла	0,009	0,007	
$C_3^{P_m}$	$C_1^3$	Материалы для генерации и хранения энергии	0,120	0,092	
	$C_2^3$	Портативные источники питания	0,098	0,075	
	$C_3^3$	Системы накопления энергии на МЭМС	0,042	0,032	
$C_4^{P_m}$	$C_1^4$	Быстродействующие логические элементы МЭМС	0,018	0,010	
	$C_2^4$	Быстродействующие элементы на полимерах	0,010	0,005	
	$C_3^4$	Микроплазменные устройства	0,018	0,010	
	$C_4^4$	Технологии нанофотоники и графена			
	$C_4^4$	$C_{41}^4$	Нанопроволки, нанопровода, фуллерены для создания компонентной базы	0,036	0,019
		$C_{42}^4$	Технологии быстродействующих ИС и логических элементов с УНТ	0,047	0,025
		$C_{43}^4$	Кремневая нанофотоника	0,073	0,037
		$C_{44}^4$	Технологии быстродействующей компонентной базы на основе графена	0,107	0,055
$C_5^{P_m}$	$C_1^5$	Технологии микро и нанопроцессоров			
	$C_1^5$	$C_{11}^5$	Процессоры на графеновых транзисторах	0,026	0,044
		$C_{12}^5$	Процессоры на алмазных транзисторах	0,06	0,009
		$C_{13}^5$	Процессоры на графене и нитриде бора	0,012	0,020
		$C_{14}^5$	Процессоры НЭМС	0,06	0,009
		$C_{15}^5$	Процессоры с фотонной обработкой	0,027	0,044
	$C_2^5$	СВЧ МЕМС/НЕМС			
	$C_2^5$	$C_{21}^5$	Технологии СВЧ МЕМС компонентов	0,020	0,033
		$C_{22}^5$	Технологии СВЧ НЕМС компонентов	0,081	0,134
	$C_3^5$	Технологии монолитных интегральных схем			
	$C_3^5$	$C_{31}^5$	Технологии GaN	0,025	0,042
$C_{32}^5$		Технологии GaAs	0,006	0,010	

Отметим, что сформированный логический граф  $G_n^{P_m}$  (рис. 2) является связанным. Четвертый этап.

Формируем группу критериев  $K_2$  для оценки приоритетов технологических трендов  $C_n^{P_m}$  предметной области  $P_m$

С учетом специфики предметной области и рекомендаций [11, 15, 16] можно представить систему критериев  $K_2$  в следующем виде (рис. 3).

$K_2(\text{ФК})$  – Функциональные критерии:

ФК1 – Зона обзора РЛК;

ФК2 – Разрешающая способность РЛК;

ФК3 – Точность измерения координат и параметров объектов;

ФК4 – Помехозащищенность РЛК;

ФК5 – Пропускная способность РЛК.

$K_2(\text{ТЭ})$  – Техничко-экономические критерии:

ТЭ1 – Массо-габаритные характеристики;

ТЭ2 – Энергопотребление;

ТЭ3 – Надёжность;

ТЭ4 – Стоимость.

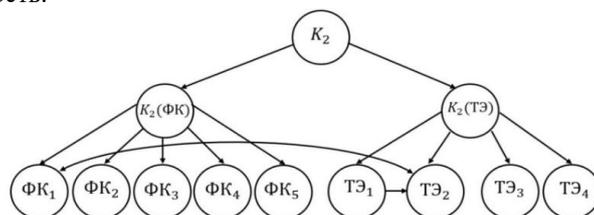


Рис. 3 Структура системы критериев  $K_2$

Структура системы критериев  $K_2$  так же является связанной (рис 3.).

Это обусловлено наличием взаимосвязи энергопотребления с массогабаритными характеристиками и зоной обзора.

Таким образом в результате выполнения 4 этапа получили связанную систему критериев  $K_2$  и связанный логический граф технологий  $G_n^{Pm}$

Поэтому решение данной задачи в общем случае следует рассматривать в сетевом варианте на основе МАС [9, 10, 14,15].

Пятый этап – оценка приоритетов технологических трендов  $\bar{\rho}_n^{Pm}$

Для каждого типа критериев (функциональные, технико-экономические) суперматрицу  $W$  можно представить в следующем виде [14]

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & | & \\ X & Y & 0 & & \\ 0 & Z & I & & \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $X$  – вектор приоритетов критериев относительно цели.  $Y$  – матрица собственных векторов, характеризующих зависимости между критериями.  $Z$  – матрица собственных векторов приоритетов альтернатив относительно критериев.  $I$  – единичная матрица.

Возведение суперматрицы  $W$  в степени дает в предельном случае требуемое решение  $W(pr)$  в следующем виде [14]:

$$W(pr) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ Z(I-Y)^{-1}X & Z(I-Y)^{-1} & I \end{bmatrix} \quad (3)$$

Таким образом, вычислительная процедура сводится к построению вектора  $X$  и матриц  $X$ ,  $Z$  [9, 23] (на основе методологии МАИ) для каждой группы критериев и последующему вычислению предела суперматрицы  $W$  [14]. Искомый вектор весов альтернатив с учетом рассмотренных типов зависимостей определяется как компонент предельной суперматрицы  $W$  ( $pr$ ) в левом нижнем углу предельной матрицы.

Рассмотрим практическую реализацию предложенной процедуры.

Для системы критериев K2 (рис. 3) в соответствии с общей методикой [25] по методологии МАИ [13] проводим оценку числовых значения соответствующих нормированных собственных векторов (векторов приоритетов), необходимых для формирования компонент суперматрицы. Полученные значения векторов приоритетов, соответственно, функциональных и технико-экономических критериев относительно цели представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Оценка вектора приоритетов функциональных критериев.**

Вектор приоритетов	Зона обзора	Разрешающая способность	Точность измерения	Помехозащитность	Пропускная способность
K2(ФК)	0.076	0.247	0.499	0.038	0.140

Таблица 3

**Оценка вектора приоритетов технико-экономических критериев.**

Вектор приоритетов	Массогабариты	Энергопотребление	Надёжность	Стоимость
K2(ТЭ)	0.110	0.434	0.414	0.042

При построении обратносимметричных матриц, для вычисления векторов приоритетов, представленных в табл. 2 и 3 в качестве ключевого, формулировался следующий вопрос: какой из каждой пары критериев в большей степени влияет на боевые возможности псевдоорбитальных спутников (БПЛА).

В табл. 4 и 5 приведены матрицы собственных векторов приоритетов альтернатив  $C_n^{Pm}$  (технологических трендов) относительно функциональных и технико-экономических критериев.

Соответствующие обратносимметричные матрицы строились для следующего ключевого вопроса: – какое из двух технологических направлений в большей степени обеспечивает удовлетворение этого критерия.

Таблица 4

**Матрица приоритетов технологических трендов относительно функциональных критериев**

$\bar{M}_n^{Pm}[K2(ФК)]$	Зона обзора	Разрешающ. способность	Точность	Помехозащитность	Пропускная способность
Схемная интеграция	0.149	0.160	0.414	0.131	0.248
Быстродейств. комп. база	0.427	0.234	0.262	0.265	0.450
Энергообеспечение	0.294	0.478	0.097	0.454	0.107
Управление теплом	0.082	0.079	0.169	0.082	0.151
Функ. композ. материалы	0.048	0.049	0.058	0.068	0.044

Таблица 5

**Матрица приоритетов технологических трендов относительно технико-экономических критериев.**

$\bar{M}_n^{Pm}[K2(ТЭ)]$	Массогабариты	Энергопотребление	Надёжность	Стоимость
Схемная интеграция	0.454	0.427	0.397	0.448
Быстродейств. комп. база	0.049	0.166	0.302	0.149
Энергообеспечение	0.152	0.274	0.162	0.272
Управление теплом	0.096	0.087	0.093	0.052
Функ. композ. материалы	0.249	0.046	0.046	0.079

Результаты оценки взаимной зависимости, соответственно, функциональных и технико-экономических критериев представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 6

**Оценка взаимного влияния функциональных критериев**

К2(ФК)	Зона обзора	Разрешающ. способность	Точность	Помехозащищенность	Пропускная способность
Зона обзора	0	0.547	0.682	0	0.122
Разрешающ. способность	0.403	0	0.236	0.200	0.558
Точность	0.443	0.345	0	0.800	0.320
Помехозащищенность	0	0.108	0.82	0	0
Пропускная способность	0.154	0	0	0	0

Таблица 7

**Оценка взаимного влияния технико-экономических критериев**

К2(ТЭ)	Массогабариты	Энергопотребление	Надёжность	Стоимость
Массогабариты	0	0.80	0.627	0.604
Энергопотребление	0.280	0	0.280	0.291
Надёжность	0.627	0.20	0	0.105
Стоимость	0.093	0	0.093	0

При построении обратносимметричных матриц для вычисления векторов приоритетов табл. 6, 7 формулировался ключевой вопрос: какой из двух сравниваемых критериев оказывает наибольшее влияние на обеспечение требований группы критериев?

В результате проведенных расчетов (табл. 1–6) формированы исходные данные, необходимые для построения суперматриц  $W$ .

При этом придерживаясь схемы обозначений, представленной в суперматрице, отметим следующее.

Значения вектора  $X$  определяют таблицы 1 и 2, а значения матрицы  $Z$  – табл. 3 и 4 – приоритеты альтернатив (технологических направлений), соответственно, для функциональных и технико-экономических критериев. Значения матрицы  $Y$  – в табл. 5, 6 (соответственно для функциональных и технологических критериев).

Проведем необходимые расчеты с построенными суперматрицами.

При этом значения:

$X$  –  $\bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ФК}), \bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ФЭ})$  – вектор приоритетов критериев относительно цели (табл. 2 и 3).

$Z$  –  $\bar{M}_n^{Pm}[K2(\text{ФК})], \bar{M}_n^{Pm}[K2(\text{ТЭ})]$  матрицы векторов приоритетов технологических трендов относительно группы критериев  $K2$  (табл. 3, 4).

$Y$  –  $K2(\text{ФК}), K2(\text{ТЭ})$  матрица влияния между группами критериев (табл. 5 и 6).

Полученные результаты обеспечивают возможность проведения сравнительного анализа оценок приоритетов технологических трендов  $\bar{\rho}_n^{Pm}(K^*2)$  учетом связности критериев.

Анализ и оценка приоритетов технологий логического графа  $G_n^{Pm}$  (рис.) в случае большой размерности и невысокой связности может быть проведен на основе МАИ [14].

Для этого:

1. Определим приоритеты рассматриваемых технологических трендов в предположении взаимной независимости критериев и альтернатив.

Значения элементов векторов приоритетов, представленные в табл. 8.

Таблица 8

**Приоритеты технологических трендов при отсутствии взаимозависимостей критериев**

$\bar{\rho}_n^{Pm}(K2)$	$C_1^{Pm}$	$C_2^{Pm}$	$C_3^{Pm}$	$C_4^{Pm}$	$C_5^{Pm}$
$\bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ФК})$	0.30	0.29	0.22	0.14	0.05
$\bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ТЭ})$	0.42	0.21	0.21	0.09	0.07

2. Определим приоритеты рассматриваемых технологических трендов в случае связности критериев и альтернатив (рис. 2, 3).

В табл. 9 приведены результаты расчётов на суперматрице  $W$ , полученные в предположении взаимозависимости лишь между критериями.

Таблица 9

**Приоритеты технологических трендов при наличии взаимозависимостей между критериями**

$\bar{\rho}_n^{Pm}(KZ^*)$	$C_1^{Pm}$	$C_2^{Pm}$	$C_3^{Pm}$	$C_4^{Pm}$	$C_5^{Pm}$
$\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K)$	0.26	0.31	0.26	0.12	0.05
$\bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ)$	0.43	0.16	0.20	0.09	0.11

Результаты проведенного анализа, представленные в табл. 7 и 8, показывают, что в случае взаимозависимости критериев заметно изменилась приоритеты технологических трендов.

Так, в части функциональной оценки  $\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K)$ :

- ◆ на первое место выходят технологии создания быстродействующей компонентной базы, приоритет которых заметно выше технологий интеграции (которым соответствует первый приоритет в табл. 8)

- ◆ и технологий генерации и хранения энергии (разделяют 2 и 3 места в табл. 9).

Можно полагать, что такое положение связано с тем, что в силу специфики функционального использования рассматриваемых РЛК требование высокой скорости обработки информации является преобладающим. Этот факт более четко проявляется при учёте взаимозависимостей между используемыми критериями.

В части технико-экономической оценки  $\bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ)$ :

- ◆ первый приоритет по-прежнему сохраняется за технологиями интеграции,

- ◆ а на вторую позицию выходят технологии генерации и хранения энергии.

Такая ранжировка, связана с более точной оценкой приоритетов для данной предметной области применения рассматриваемых РЛК, где вопросы ограничения массогабаритных характеристик и энергообеспечения выходят на передний план, и эта ситуация более адекватно отображается при учёте взаимозависимости используемых критериев.

Шестой этап. На основании результатов полученных на этапах 3-6 можно получить интегральные оценки приоритетов отдельных технологий с учетом связности критериев  $KZ^*$  и связного логического графа технологий  $G_n^{Pm}$ .

Оценка вектора приоритетов отдельных технологий может быть получена по критерию  $KЗ(c_{ij}^n)$  – какая из сравниваемых технологий наиболее значима для реализации тренда.

Полученные интегральные оценки приоритетов отдельных технологий  $\bar{\rho}_{ij}^{Pm}(c_{ij}^n)$  для групп функциональных и технико-экономических критериев представлены в табл. 1.

**Выводы.** Рассмотрена прикладная задача сравнительной оценки приоритетов направлений исследований и разработок для создания РЛК для выбранного сегмента сенсорной решетки СЦУ.

Предложена процедура формирования иерархической системы критериев и поэтапного анализа векторов приоритетов.

Проведен анализ ее эффективности на примере создания и развития технологических трендов и технологий радиолокационной составляющей сенсорной решетки СЦУ.

Показано, что использование метода аналитических сетей в случае связности критериев и технологий обеспечивает:

- ◆ получение более достоверных оценок приоритетов и построения прогнозов технологического развития и имеет значительные преимущества перед существующими подходами.

- ◆ снижение рисков при построении дорожных карт и программ научно-технологического развития и получении более объективных прогнозных оценок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Буренок В.М., Кравченко Ф.Ю., Смирнов С.С.* Курс – на сетцентрическую систему вооружения. – URL: <http://www.dogswar.ru/> (дата обращения: 06.04.2016).
2. *Буренок В.М.* Базис сетцентрических войн – опережение, интеллект, инновации. Независимое военное обозрение, 02.04.2010. – URL: [http://nvo.ng.ru/concepts/2010-04-02/1\\_bazis.html?print=Y](http://nvo.ng.ru/concepts/2010-04-02/1_bazis.html?print=Y) (дата обращения: 06.04.2016).
3. *Хамзатов М.М.* Влияние концепции сетцентрической войны на характер современных операций // Военная мысль. – 2006. – № 7. – С. 13-17.
4. *Кондратьев А.Е.* Проблемные вопросы исследования новых сетцентрических концепций вооруженных сил ведущих зарубежных стран // Военная мысль. – 2009. – № 11. – С. 61-74.
5. *Долгополов А.В., Богданов С.А.* Эволюция форм и способов ведения вооружённой борьбы в сетцентрических условиях // Военная мысль. – 2011. – № 2. – С. 49-58.
6. *Белевцев А.М., Бальбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А.* Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // Известия ЮФУ, Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 35-45.
7. *Seidler S.* Principles of Computer Communications Network Design. – Chichester: Horwood, 1992. – 507 p.
8. *Kurt G., Khoshkholgh M.G., Alfattani S., Ibrahim A., Darwish T.S.J., Alam M.S., ... Yongacoglu A.* A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future (Version 4) // arXiv. – 2020. <http://doi.org/10.48550/ARXIV.2007.15088>.
9. *Паршин С.А., Горбачев Ю.Е., Кожанов Ю.А.* Современные тенденции развития теории и практики управления в вооруженных силах США. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 268 с.
10. *Бальбердин В.А., Зубарев И.В., Панов В.В., Степанов О.А.* Прикладные аспекты автоматизации управления войсками и оружием в современных условиях. – М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2013. – 168 с.
11. *Бальбердин В.А., Белевцев А.М., Бендерский Г.П.* Прикладные методы оценки и выбора решений в стратегических задачах инновационного менеджмента. – М.: Дашков, 2013. – 240 с.
12. «Рогозин назвал пять потенциальных угроз для России», РБК daily, 2013. – <http://rbedaily.ru/politics/562949987608613>.
13. *Saaty T.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.
14. *Saaty T.L.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях. – М.: Либроком, 2009. – 358 с.
15. ISO/IEC 25010. Systems and Software Engineering // Systems and Software Quality Requirements and Evaluation. – 2010.
16. ISO/IEC 25023. Systems and Software Engineering // Systems and Requirements and Evaluation. Measurement of System and Software Product Quality. – 2012.
17. *Saaty T.L.* Decision Making for Leaders. RWS Publications. – Ellswjorth Ave, Pittsburg, PA, 1999. – 360 p.
18. *Saaty T.L.* The Brain, Unraveling the Mystery of How It Works: The Neutral Network Process. – RWS Publications. Pittsburg, PA 152123, 2000. – 220 p.
19. DARPA's ISIS – Integrated Sensor is Structure [Surveillance Airship].
20. Lockheed Martin Lighter-Than-Air Programs. <http://kiss.caltech.edu/workshops/airship2013/presentations/horvarter.pdf> (дата обращения: 06.04.2016).
21. ISIS – Integrated Sensor Is Structure Disruptive, Affordable, C2ISR Persistence. [http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/aero/documents/P11-1155528\\_ISIS%20Litho%20Print.pdf](http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/aero/documents/P11-1155528_ISIS%20Litho%20Print.pdf) (дата обращения: 06.04.2016).
22. ISIS - проект DARPA по созданию беспилотного дирижабля-шпиона. – URL: <http://rnns.ru/137273-isis-proekt-darpa-po-sozdaniyu-bespilotnogo.html> (дата обращения: 06.04.2016).
23. HAPS – High-altitude platform systems - International Telecommunication Union (ITU). – <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> 2025.
24. HAPS – missions to the edge of space to watch over Earth - European Space Agency. – [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/HAPS\\_missions\\_to\\_the\\_edge\\_of\\_space\\_to\\_watch\\_over\\_Earth](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/HAPS_missions_to_the_edge_of_space_to_watch_over_Earth) 2018.
25. *Белевцев А.А., Белевцев А.М., Бальбердин В.А.* Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6.

## REFERENCES

1. *Burenok V.M., Kravchenko F.Yu., Smirnov S.S.* Kurs – na setetsentricheskuyu sistemu vooruzheniya [Heading towards a network-centric weapons system]. Available at: <http://www.dogswar.ru/> (accessed 06 April 2016).

2. *Burenok V.M.* Bazas setetsentricheskikh voyn – operezhenie, intellekt, innovatsii. Nezavisimoe voennoe obozrenie, 02.04.2010 [The basis of network-centric warfare – advancing, intelligence, innovation. Nezavisimoye Voyennoye Obozreniye, 02.04.2010]. Available at: [http://nvo.ng.ru/concepts/2010-04-02/1\\_bazis.html?print=Y](http://nvo.ng.ru/concepts/2010-04-02/1_bazis.html?print=Y) (accessed 06 April 2016).
3. *Khamzatov M.M.* Vliyanie kontseptsii setetsentricheskoy voyny na kharakter sovremennykh operatsiy [The impact of the concept of network-centric warfare on the nature of modern operations], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2006, No. 7, pp. 13-17.
4. *Kondrat'ev A.E.* Problemnye voprosy issledovaniya novykh setetsentricheskikh kontseptsiy vooruzhennykh sil vedushchikh zarubezhnykh stran [Problematic issues in the study of new network-centric concepts of the armed forces of leading foreign countries], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2009, No. 11, pp. 61-74.
5. *Dolgopolov A.V., Bogdanov S.A.* Evolyutsiya form i sposobov vedeniya vooruzhennoy bor'by v setetsentricheskikh usloviyakh [Evolution of forms and methods of conducting armed warfare in network-centric conditions], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2011, No. 2, pp. 49-58.
6. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A.* Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tekhnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommunikatsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of development directions of nano- and IT technologies for building specialized new-generation network communication systems], *Izvestiya YuFU, Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3, pp. 35-45.
7. *Seidler S.* Principles of Computer Communications Network Design. Chichester: Horwood, 1992, 507 p.
8. *Kurt G., Khoshkholgh M.G., Alfattani S., Ibrahim A., Darwish T.S.J., Alam M.S., ... Yongacoglu A.* A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future (Version 4), *arXiv*, 2020. Available at: <http://doi.org/10.48550/ARXIV.2007.15088>.
9. *Parshin S.A., Gorbachev Yu.E., Kozhanov Yu.A.* Sovremennye tendentsii razvitiya teorii i praktiki upravleniya v vooruzhennykh silakh SShA [Modern trends in the development of the theory and practice of control in the US armed forces]. Moscow: LENAND, 2009, 268 p.
10. *Balyberdin V.A., Zubarev I.V., Panov V.V., Stepanov O.A.* Prikladnye aspekty avtomatizatsii upravleniya voyskami i oruzhiem v sovremennykh usloviyakh [Applied aspects of the automation of troop and weapons control in modern conditions]. Moscow: 3 TSNII MO RF, 2013, 168 p.
11. *Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Benderskiy G.P.* Prikladnye metody otsenki i vybora resheniy v strategicheskikh zadachakh innovatsionnogo menedzhmenta [Applied methods of evaluation and selection of solutions in strategic tasks of innovation management]. Moscow: Dashkov, 2013, 240 p.
12. «Rogozin nazval pyat' potentsial'nykh ugroz dlya Rossii», RBK daily, 2013 ["Rogozin Named Five Potential Threats to Russia", RBC Daily, 2013]. Available at: <http://rbcdaily.ru/politics/562949987608613>.
13. *Saati T.* Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision making. The analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 314 p.
14. *Saati T.L.* Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh [Decision making with dependencies and feedbacks]. Moscow: Librokom, 2009, 358 p.
15. ISO/IEC 25010. Systems and Software Engineering, *Systems and Software Quality Requirements and Evaluation*, 2010.
16. ISO/IEC 25023. Systems and Software Engineering, *Systems and Requirements and Evaluation. Measurement of System and Software Product Quality*, 2012.
17. *Saati T.L.* Decision Making for Leaders. RWS Publications. Ellswjorth Ave, Pittsburgh, PA, 1999, 360 p.
18. *Saati T.L.* The Brain, Unraveling the Mystery of How It Works: The Neutral Network Process. RWS Publications. Pittsburgh, PA 152123, 2000, 220 p.
19. DARPA's ISIS – Integrated Sensor is Structure [Surveillance Airship].
20. Lockheed Martin Lighter-Than-Air Programs. Available at: <http://kiss.caltech.edu/workshops/airship2013/presentations/horvarter.pdf> (accessed 06 April 2016).
21. ISIS – Integrated Sensor Is Structure Disruptive, Affordable, C2ISR Persistence. Available at: [http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/aero/documents/P11-1155528\\_ISIS%20Litho%20Print.pdf](http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/aero/documents/P11-1155528_ISIS%20Litho%20Print.pdf) (accessed 06 April 2016).
22. ISIS - proekt DARPA po sozdaniyu bespilotnogo dirizhablya-shpiona [ISIS is a DARPA project to create an unmanned spy airship]. Available at: <http://rns.ru/137273-isis-proekt-darpa-po-sozdaniyu-bespilotnogo.html> (accessed 06 April 2016).
23. HAPS – High-altitude platform systems - International Telecommunication Union (ITU). Available at: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> 2025.
24. HAPS – missions to the edge of space to watch over Earth - European Space Agency. Available at: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/HAPS\\_missions\\_to\\_the\\_edge\\_of\\_space\\_to\\_watch\\_over\\_Earth](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/HAPS_missions_to_the_edge_of_space_to_watch_over_Earth) 2018.

25. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. Metodika analiza i otsenki prioritetrov tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methodology for analysis and assessment of priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.

**Белевцев Андрей Михайлович** – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

**Белевцев Андрей Андреевич** – ПАО «Сбербанк»; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: + 74959575731.

**Балыбердин Валерий Алексеевич** – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79162386854; д.т.н.; профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

**Belevtsev Andrey Michailovitch** – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

**Belevtsev Andrey Andreevich** – Sberbank PJSC; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; phone: + 74959575731.

**Balyberdin Valery Alekseevich** – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79162386854; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 004.4

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-58-80

**Н.Д. Болдырев, В.В. Гилка, А.С. Кузнецова, Д.А. Морозов**

### **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ: ОБЗОР И КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БПЛА**

*Природные пожары ежегодно наносят серьёзный урон экосистемам, экономике и безопасности населения, а своевременное обнаружение возгораний и прогнозирование их развития повышает оперативность реагирования на угрозу и позволяет оптимально распределять ресурсы при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Существующие методы мониторинга ограничены скоростью обнаружения очагов возгорания и оперативностью их дальнейшего распространения, что снижает эффективность действий спасательных служб. Для решения данной проблемы могут использоваться гетерогенные источники данных, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), распределённые датчиковые сети, мобильные комплексы полевого наблюдения, наземные тепловизионные станции и т.д., которые могут способствовать проведению более точного анализа текущей обстановки и повышению достоверности прогнозных моделей распространения пожаров. Целью исследования стала разработка концепции автоматизированного подхода к мониторингу и прогнозированию природных пожаров на основе беспилотных летательных аппаратов. Мы считаем, что такой подход сумеет повысить оперативность обнаружения очагов возгорания и точность прогнозирования их распространения. Задачи включают анализ существующих методов мониторинга, формирование концепции системы, интегрирующей многоспектральную съёмку, оптимизированную передачу данных, автоматическую сегментацию и прогнозирование на основе машинного обучения, а также обеспечивающей взаимодействие оператора и специалистов по оповещению. В работе использовались методы сбора, анализа и передачи данных с БПЛА, обработка многоспектральных изображений, машинное обучение и нейронные сети для детекции очагов возгорания, алгоритмы сегментации изображений и имитационное моделирование для прогнозирования распространения огня, визуализация данных для поддержки принятия решений оператором и администратором, логирование и анализ результатов для обучения моделей, программная инженерия и технологии человеко-машинного взаимодействия. Система сократит время обнаружения и прогнозирования пожаров, предоставит возможность оператору запускать несколько дронов одновременно и автоматизирует обработку получаемых с них данных. Автоматизация процессов позволит сократить время реакции на ЧС и численность персонала,*