УДК 621.315.5

О ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

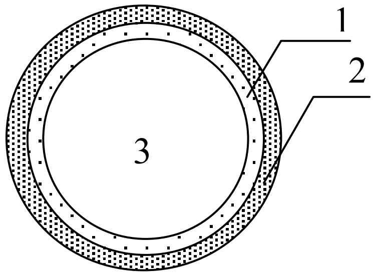
к.т.н. Г.Ф. Коняхин, А.Ю. Мелашенко*
(представил проф. В.Е. Пустоваров)

В статье рассматривается возможность снижения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) летательных аппаратов (ЛА) с помощью применения полупроводникового радиопоглощающего материала, нанесенного на покрытие из радиоактивного вещества.

Основной целью использования радиопоглощающих покрытий является, прежде всего, снижение энергетических уровней отраженного сигнала и, как результат, уменьшение эффективной поверхности рассеяния летательных аппаратов. Общие недостатки радиопоглощающих материалов, ограничивающие их применение для снижения заметности ЛА, - относительно невысокая диапазонность и значительная масса [1, 2].

Актуальность проблемы снижения ЭПР ЛА и ее практическое значение обусловили необходимость постановки и решения задачи уменьшения интенсивности отражения радиоволн путем использования дополнительного полупроводникового материала, нанесенного на покрытие из радиоактивного вещества. В качестве радиоактивного источника предлагается Po - 210 (полоний - 210), т.к. при распаде он создает α - частицы, обладающие большой ионизирующей способностью по сравнению с другими частицами.

Схема устройства приведена на рис. 1. Толщину слоя полупроводника выбираем порядка длины свободного пробега α - частицы в этом материале.



1 – радиоактивное покрытие
2 – полупроводниковое покрытие
3 – объект
Рисунок 1 – Структурная схема предлагаемого покрытия

Рассмотрим работу предлагаемого устройства. При инжекции α - частиц из радиоактивного вещества (1) в покрытии из полупроводника (2) возбуждается неравновесное электронное состояние. При этом изменяются электродинамические параметры материала, увеличивается глубина проникновения электромагнитного поля в полупроводник и затухание поля в материале.

Это обусловлено следующими причинами. При падении электромагнитной волны на поверхность твердого тела поле волны проникает вглубь материала на толщину скин - слоя [3]. Для реальных диэлектриков эта величина может быть большой (десятки метров), для металлов - незначительной (~0,001 см). Но именно эта величина и определяет скорость поглощения энергии волны в веществе при его термодинамически равновесном состоянии. По этой же причине поглощающее покрытие состоит из проводящих, металлических образований, размещенных внутри диэлектрика. Это обеспечивает увеличение глубины скин - слоя (за счет диэлектрика) и поглощение волн за счет омических потерь наведенных токов в металлических включениях. Аналогичный характер имеет поглощение волн и в полупроводниковых материалах [4]. Таким образом, разные материалы в равновесном состоянии отличаются друг от друга разной скоростью генерации джоулева тепла (потери в веществе) в слое вещества единичной толщины и разной глубиной проникновения. Вещества с большим удельным поглощением (реальные металлы – в них возбуждаются большие токи) имеют аномально малую глубину проникновения поля. В диэлектриках проводимость мала, возбуждаемые токи низкие и удельное поглощение волны мало. Использование же диэлектриков с большой толщиной вещества связано с уже указанными недостатками – значительной массой и габаритами.

В предлагаемом устройстве можно получить аномально большую глубину проникновения поля в вещество (за счет возбуждения в нем неравновесных электронных состояний) при значительной проводимости вещества (удельной энергии поглощения). Диэлектрическая проницаемость вещества, определяющая поведение материала во внешнем электромагнитном поле, может быть записана в общем виде как [5]

$$\varepsilon = 1 + \delta\varepsilon, \tag{1}$$

где $\delta\varepsilon$ - добавка к проницаемости свободного пространства.

Характерно, что величина и знак этой добавки зависят от характера распределения электронов в веществе [6]. Для равновесной плазмы и для материалов (в том числе и для металлов), облучаемых волнами с большими частотами ω, величина ε равна [7]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \tag{2}$$

где $\omega_p = \left(4\pi n e^2/m\right)^{1/2}$ - плазменная частота, n – плотность свободных зарядов, e/m –удельный заряд частицы.

Для неравновесного распределения электронов, когда функция распределения частиц по скоростям **f (V)** отличается от равновесной,

$$\delta_\varepsilon = \frac{2\pi e^2}{\omega k}\int 2\pi \frac{p_\perp^2}{p\left(\frac{m\omega}{k} - p_l\right)} \cdot \frac{\partial f}{\partial p} dp_l dp_\perp p_\perp, \tag{3}$$

где $\mathbf{p}$ – импульс частицы ($\mathbf{p_l}$, $\mathbf{p_\perp}$ - нормальная и продольная составляющие импульса), **к** – волновое число. Отметим, что знак δ_ε определяется знаком производной $\partial f/\partial p$. Для равновесной функции во всей области изменения энергии $\partial f/\partial p < 0$, поэтому $\delta_\varepsilon<0$ [5]. Дисперсионное уравнение для поперечной электромагнитной волны имеет вид [6]

$$\varepsilon(k,\omega) = \frac{k^2c^2}{\omega^2} = 1 + \delta\varepsilon \tag{4}$$

или

$$\omega^2 = k^2c^2 - \delta\varepsilon\omega^2. \tag{5}$$

В равновесном случае

$$\delta\varepsilon = -\frac{\omega_p^2}{\omega^2}; \qquad \omega^2 = k^2c^2 + \omega_p^2. \tag{6}$$

Как видно из этих формул, увеличение ε эквивалентно уменьшению ω_p или увеличению глубины проникновения поля в вещество

$$\delta \sim \frac{c}{\omega_p}. \tag{7}$$

Создание участков с положительной производной $\partial f/\partial p$ в термодинамически равновесном электронном газе (в решетке твердого тела) можно получить с помощью источников частиц в импульсном пространстве (рис. 2).

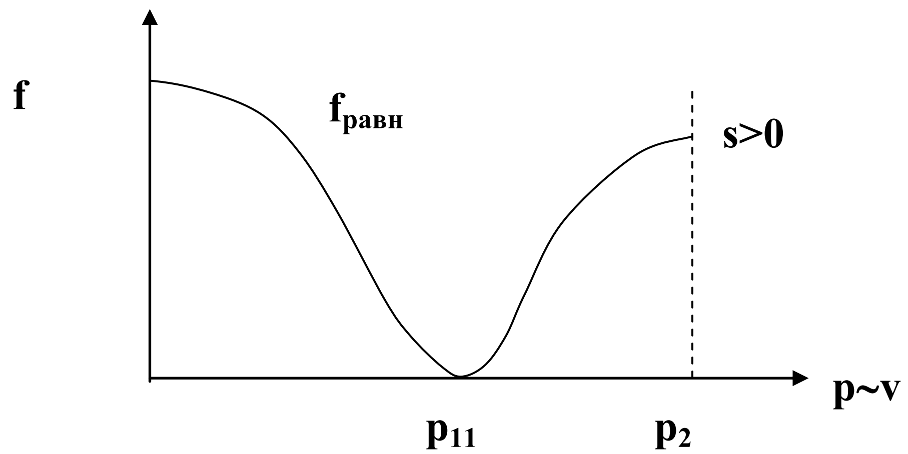


Рисунок 2 – Функция распределения частиц по скоростям

Наличие источников и стоков позволяет получить степенные распределения [8]

$$\mathbf{f(p) = f_{равн}(p) \cdot \Theta(p - p_1) + Ap^s\Theta(p - p_2) \cdot \Theta(p - p_1)}, \qquad (8)$$

где

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0. & x < 0, \end{cases}$$

$\mathbf{f_{равн}}$ – равновесная функция распределения, **s** – показатель степени, $\mathbf{p_1}$, $\mathbf{p_2}$ – место расположения стока и источника, **A** – интенсивность источника.

Существование неравновесных степенных распределений отмечено в работе [9]. Для степенной функции распределения

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\left(1 - \alpha_s \frac{n_s}{n}\right), \qquad (9)$$

где

$$\alpha_s = \frac{s+3}{2}\left(\frac{s}{s+2} + \frac{1}{s+3} - \frac{s}{(s+2)(s+3)} - \frac{1}{3}\right);$$

$$n_s = \frac{4\pi A}{s+3}\left(p_2^{s+3} - p_1^{s+3}\right).$$

Сопоставляя ε для равновесного и неравновесного случаев, видим, что закон дисперсии отличается величиной ω_p

$$\left(\omega_p\right)^2_{неравн} = \omega_p^2\left(1 - \alpha_s \frac{n_s}{n}\right), \qquad (10)$$

а глубина проникновения волны в вещество

$$\delta_{неравн} = \frac{c}{\left(\omega_p\right)_{неравн}} = \frac{\delta}{\sqrt{1 - \alpha_s n_s / n}} > \delta. \qquad (11)$$

Неравновесное распределение в твердом веществе создается α - частицами радиоактивного распада при их движении через это вещество [10]. Так как степень увеличения глубины проникновения поля $\mathbf{\delta_{неравн}}$ в вещество зависит от величины отношения $\mathbf{n_s/n}$, то для получения сравнительно большой величины $\mathbf{n_s/n}$ при умеренной интенсивности источника **A**, целесообразны полупроводники равновесная плотность свободных электронов которых равна: для примесных полупроводников $10^{15} \div 10^{18}$ см$^{-3}$, для собственных - $10^{10} \div 10^{13}$ см$^{-3}$).

Для оценки параметров предлагаемого технического решения рассматривалась задача о состоянии однокомпонентной электронной плазмы, нейтрализованной распределенным положительным зарядом. При сравнительно высоких температурах (температура вещества больше дебаевской температуры, $\mathbf{T \approx 300\ K}$) основной вклад в процесс релаксации вносят электрон – электронные столкновения, которые описывались интегралом столкновения Ландау. Кинетические уравнения, описывающие поведение функции распределения $\mathbf{f}$, записывались согласно работы [12]. Источник и сток учитывались следующим образом. Источник моделировался добавлением на каждом шаге по времени счета слагаемых к функции распределения вида $\mathbf{A/H}$ в точке $\mathbf{x = x_{ист}}$, где $\mathbf{H}$ – шаг схемы расчета по безразмерной скорости $\mathbf{x}$. Это соответствует дельта - функции $\mathbf{T \cdot A \cdot \delta(x - x_{ист})}$ в правой части уравнения (1.5), приведенного в [11], $\mathbf{T}$ – шаг по времени. Сток вводился в уравнение кинетики (1.5) граничным условием $\mathbf{x = x_c}$, $\mathbf{f = 0}$. Это соответствует, вообще говоря, бесконечно емкому стоку, захватывающему все попавшие сюда частицы. Положение стока в пространстве скоростей выбиралось из условия

$$\mathbf{x_c < x_{ист}},$$

где $\mathbf{x_c \gg x_T}$ – безразмерная скорость, соответствующая тепловому состоянию электронов вещества. Рассматривается вариант стока, учитывающий процесс рекомбинации электронов и дырок (добавлением слагаемого вида $\mathbf{(f - f_{равн})/\tau_0 x}$ в правую часть уравнения кинетики, где $\mathbf{f}$ – искомая функция, $\mathbf{f_{равн}}$ – равновесная функция, τ_0 - характерное время релаксации). Результаты расчетов для двух типов характерных стоков качественно совпадают. На рис.3 приведена характерная зависимость $\mathbf{f = f(x)}$ для полупроводника с плотностью зарядов 10^{17}см$^{-3}$, временем $\boldsymbol{\tau} = 29$ (безразмерное время, равное двадцати девяти временам столкновений электронов), радиационного катода с температурой электронов около 2 эВ. Мощность радиационного катода соответствовала 5 кюри/см^2, что достаточно для создания отношения $\mathbf{n_s/n}$=3,5. При этом величина $\boldsymbol{\delta_{неравн}}$ увеличится во много раз (~27 раз), что позволит при той же толщине покрытия увеличить в такое же число раз и интенсивность поглощения волн.

Заметим, что приведенная интенсивность радиационного покрытия не является радиационно - опасной [12].

Толщина полупроводникового покрытия выбирается такой, чтобы α-частицы отдавали свою энергию полностью электронам вещества и не выходили за пределы покрытия. Это обеспечивает полное, эффективное использование α - частиц распада. Для энергии порядка 5 МэВ, например, в алюминии длина пробега этих частиц порядка 25 мкм [12, таблица 10]. Такая же величина длины пробега и для α - частиц в полупроводниковых материалах. Материалом полупроводникового покрытия может быть, напри-

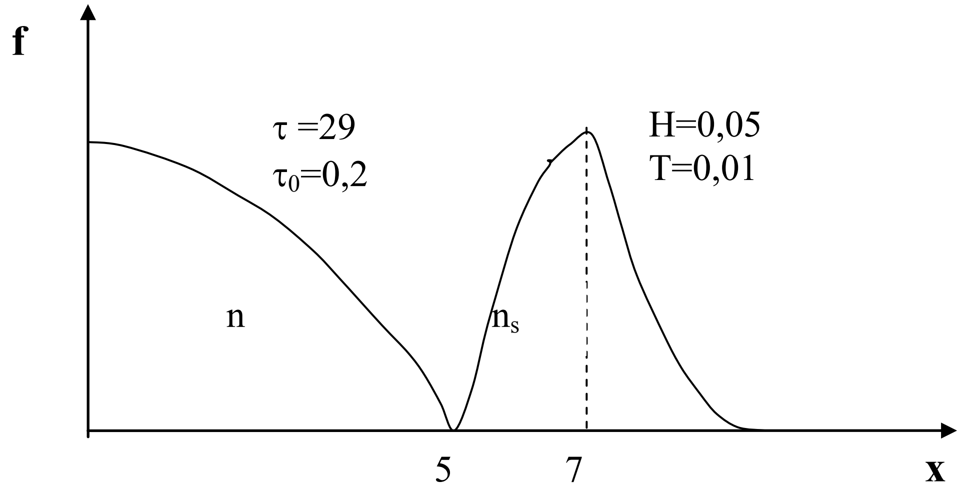


Рисунок 3 – Зависимость распределения частиц полупроводника

мер, InSb, имеющий наибольшую технологичность. Таким образом, вес аппарата за счет покрытий, приведенных выше, практически не увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Военное издательство. 1989. С. 107.
2. Шнейдерман А.Я. Радиопоглощающие покрытия. – Зарубежная радиоэлектроника. - №2, 1975, С. 95 – 99.
3. Кугушев А.М., Голубева Н.С. Основы радиоэлектроники. – М.: Энергия, 1969, С. 139.
4. Гершензон Е.М. Анизотропное поглощение электромагнитных волн горячими носителями в полупроводниках. – Физика твердого тела. №7, №5, 1965. С. 1378.
5. Займан Д. Принципы теории твердого тела. – М.: Мир. 1966. С. 263.
6. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. – М.: Наука. 1966. С. 76.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: ГИТТЛ, 1957. С. 318.
8. Моисеев С.С. Точные степенные решения кинетических уравнений для частиц. – ЖЭТФ. – Т. 71, № 1. 1976. С. 177 – 192.

9. Моисеев С.С. Механизм образования быстрых электронов эмиссии из металла. – Письма в ЖЭТФ. – Т. 21, № 9, 1975. С. 525 – 528.

10. Моисеев С.С. Карась В.Н. О возможности использования неравновесных распределений для создания радиоактивных покрытий. – Препринт. № 77 – 24. Харьков, ФТИ, 1977. С. 3 – 12.

11. Бобелев А.В., Чуянов В.А. О численном решении кинетического уравнения Ландау. – Журнал вычислительной математики и математической физики. – Т. 16. № 2, 1977. С. 407 – 416.

12. Краткий справочник инженера – физика. Ядерная и атомная физика. – М.: Атомиздат, 1961. С. 311, 319.

УДК 681.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВАЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

к.т.н. В.П. Прохоров, М.И. Володин
(представил д.т.н., проф. Х.А. Турсунходжаев)

Рассматриваются возможные подходы использования экспертной информации в определении важности объектов сложной системы военного назначения при оценке их по нескольким критериям функционирования.

Функциональная и структурная сложность, многообразие решаемых задач и целей сложной системы, например, группировка войск, является серьезным препятствием для получения аналитических выражений, позволяющих определить важность каждого из элементов (объектов) системы в условиях неопределенной обстановки. Это обуславливает необходимость использования при оценке важности подразделений и отдельных образцов вооружения суждения специалистов (экспертов).

Рациональное использование информации, получаемой от экспертов, возможно при условии преобразования ее в форму, удобную для дальнейшего анализа и принятия окончательного решения о важности объектов.

Как правило, суждения экспертов представляются в виде числовых значений, выбираемых по некоторой шкале. Если эксперт в состоянии сравнить и оценить возможные варианты, приписав каждому из них определенное число, то можно считать, что он обладает определенной системой предпочтения. В зависимости от того, по какой шкале могут быть заданы эти предпочтения, экспертные оценки содержат больший или меньший объем информации и обладают различной способностью к математической формализации.

Можно сформулировать более строго задачу экспертной классификации объектов по важности. Каждый объект может характеризоваться совокупностью частных показателей (критериев), перечень которых считается заданным. Каждый показатель, характеризующий объект имеет свою шкалу возможных значений. Декартово произведение шкал частных показателей задает множество всех гипотетически возможных состояний объекта. В каждом из них он может обладать тем или иным значением важности. Кроме того, в зависимости от складывающейся обстановки, тот или иной частный показатель может иметь свою шкалу приоритетов (шкалу важности) и тем самым доминировать при определении общего значения важности объекта.

Когда объекты оцениваются не по одному, а по нескольким признакам, показателям, сложность анализа и обработки результатов экспертиз существенно возрастает. Более трудоемким становится определение их сравнительной предпочтительности. Для этого необходимо знать, какие факторы и в какой степени влияют на оценку объектов. Для выявления таких факторов предназначены методы многомерного метрического и не метрического шкалирования [1].

Если частные критерии $\mathbf{K_1,...,K_s}$, характеризующие объект, таковы, что $\mathbf{K_1}$ существенно важнее всех остальных частных критериев, $\mathbf{K_2}$ существенно важнее всех остальных частных критериев, за исключением $\mathbf{K_1}$, и т. д. В этом случае, если объект $\mathbf{a_i}$ имеет большую важность, чем объект $\mathbf{a_j}$ по частному критерию $\mathbf{K_1}$, то независимо от оценок $\mathbf{a_i}$ и $\mathbf{a_j}$, по остальным частным критериям $\mathbf{a_i}$, более важен, чем $\mathbf{a_j}$. Если же оценки объектов совпадают по первым $\mathbf{r}$ частным критериям и различаются по $\mathbf{(r+1)}$ - му частному критерию, то более важным в этом случае является объект более важный по $\mathbf{(r+1)}$ - му частному критерию. Такое упорядочение альтернатив по предпочтениям называется лексикографическим. Легко заметить, что при лексикографическом упорядочении все объекты оказываются строго проранжированными. Одинаково важными могут оказаться лишь объекты с совпадающими векторами оценок важности. В случае лексикографического упорядочения задача выбора заданного числа наиважнейших для эксперта объектов оказывается легко решаемой. Достаточно выбрать нужное число первых объектов в их лексикографическом упорядочении.

Однако далеко не всегда частные критерии оценки объектов $K_1,...,K_s$ настолько неравноценны и несоизмеримы по важности. Более типична ситуация, когда относительная важность частных критериев является сопоставимой.

Возникает задача формирования обобщенного критерия, с помощью которого можно рассчитать оценки важности объектов по оценкам значений частных критериев. В этом случае предлагается использовать метод свертки - построение обобщенного критерия (функции полезности, функции ценности, критерия эффективности и т. д.).

Одним из наиболее важных предположений о характере частных критериев при сопоставимых частных критериях является предположение об их независимости. Для двух объектов $(s = 2)$ они могут быть сформулированы, например, следующим образом:

$$(x_{i1}, x_{i2}) \prec (x_{j1}, x_{i2}) \Rightarrow (x_{i1}, x_{j2}) \prec (x_{j1}, x_{j2}), \tag{1}$$

$$(x_{i1}, x_{i2}) \prec (x_{i1}, x_{j2}) \Rightarrow (x_{j1}, x_{i2}) \prec (x_{j1}, x_{j2}), \tag{2}$$

где x_{i1} и x_{j1} - значения оценок важности объектов a_i и a_j по частному критерию K_1, а x_{i2} и x_{j2} - значения оценок важности объектов a_i и a_j по K_2. Соотношение (1) показывает, что важности объектов сохраняются при любых одинаковых значениях оценок по частному критерию K_2 и определяются оценками по K_1, а соотношение (2) - что важности объектов сохраняются при любых одинаковых значениях по частному критерию K_1 и определяются оценками по K_2. Однако сформулированные условия оказываются необходимыми, но недостаточными для существования аддитивных обобщенных критериев.

Сейчас известны необходимые и достаточные условия существования вещественнозначных функций $u_1(x),...,u_s(x)$ таких, что объект a_i важнее объекта a_j тогда и только тогда, когда $\sum_{\nu=1}^{s} u_\nu(x_{i\nu}) > \sum_{\nu=1}^{s} u_\nu(x_{j\nu})$, важности объектов a_i и a_j равноценны тогда и только тогда, когда $\sum_{\nu=1}^{s} u_\nu(x_{i\nu}) = \sum_{\nu=1}^{s} u_\nu(x_{j\nu})$. Исследованию функций ценности (полезности) $\sum_{\nu=1}^{s} u_\nu(x_{i\nu})$ посвящена обширная литература [2].

Нас прежде всего интересуют конкретные методы формирования обобщенных критериев, используемые при анализе и обработке экспертной информации. Линейные обобщенные критерии строятся в предположениях аддитивности частных критериев и сопоставимости их по относительной важности. Случай, когда одни из частных критериев существенно важнее других, приводит к лексикографическому упорядочению критериев, рассмотренному выше. Заметим, что сравнивать по предпочтительности целесообразно лишь однородные критерии, измеряющие интенсивность свойств одной и той же природы. В случае, когда критерии таковыми не являются, необходимо их преобразовать в однородные. Для этого, если измерения по частным критериям произведены в шкалах отношений, оценки по ним преобразовываются по формуле:

$$\mathbf{K}'_\nu = \mathbf{K}_\nu / \bar{\mathbf{x}}_\nu,\ \nu \in (1,...,s),$$

где $\bar{\mathbf{x}}_\nu$ - максимально возможная оценка по ν-му критерию. Если измерения по частным критериям произведены в шкалах интервалов, оценки преобразовываются по формуле:

$$\mathbf{K}'_\nu = (\mathbf{K}_\nu - \mathbf{x}_\nu)/(\bar{\mathbf{x}}_\nu - \underline{\mathbf{x}}_\nu),\ \nu \in \{1,...,s\}$$

где $\underline{\mathbf{x}}_\nu$ - минимальная оценка по ν - му критерию [3].

Один из широко используемых методов сравнительной оценки многокритериальных альтернатив (объектов оцениваемых по нескольким критериям) в практических исследованиях - метод обобщенных линейных критериев, в котором предполагается отыскание весовых коэффициентов, содержащих большую информацию о сравнительной важности (значимости) критериев, чем измерение в шкале порядка. А именно, предполагается, что известна информация о численных оценках важности (значимости) отдельных частных критериев - о мультипликативном метризованном отношении линейного порядка на множестве частных критериев $\tilde{\mathbf{Q}} = \langle \mathbf{Q}, \mathbf{W}(\mathbf{Q}) \rangle$, где $\mathbf{Q}$ - отношение предпочтения, а $\mathbf{W}(\mathbf{Q}) = \{\mathbf{w}_{pq} = \alpha_p / \alpha_q\}$ - $\mathbf{w}_{pq}$ показывает, во сколько раз $\mathbf{K}_p$ важнее $\mathbf{K}_q$. Кроме того, по определению мультипликативного метризованного отношения для метризованных отношений $\tilde{\mathbf{Q}}$ выполняется усиленное условие транзитивности: $\mathbf{w}_{pr} = \mathbf{w}_{pq}\mathbf{w}_{qr}$, если $(\mathbf{K}_p\mathbf{K}_q)$ и $(\mathbf{K}_q\mathbf{K}_r) \in \mathbf{Q}$. Тогда относительная важность (значимость) частных критериев измерима в шкале отношений. Если же оценки относительной важности не образуют мультипликативного метризованного отношения линейного порядка, а лишь отношение частичного порядка, то относительная важность частных критериев измерима в квазишкале отношений [1].

Измеримость оценок важности частных критериев в шкале или в квазишкале отношений делает корректной процедуру сравнительной оценки многокритериальных альтернатив с помощью обобщенного линейного критерия $\sum_{\nu=1}^{s} \alpha_\nu K_\nu(a_i)$.

Этот критерий позволяет установить отношение линейного порядка на множестве многокритериальных альтернатив, что и является одним из способов решения задачи выбора. Лучшей признается альтернатива a_{i_0}, для которой

$$\sum_{\nu=1}^{s} \alpha_\nu K_\nu(a_{i_0}) \geq \sum_{\nu=1}^{s} \alpha_\nu K_\nu(a_i),\ i \in \{1,\dots,n\}. \quad (3)$$

Если необходимо выбрать k лучших альтернатив, то ими будут k альтернатив, получивших наибольшие оценки по критерию (3).

При назначении весовых коэффициентов $\alpha_\nu, \nu \in \{1,\dots,s\}$, характеризующих относительную важность частных критериев $K_1,\dots,K_s$, необходимо производить сравнение значений критериев, соответствующих их одинаковым уровням.

Таким образом, учитывая, различную природу физического объекта предметной области, а также различные подходы к оценке степени важности сложных объектов и их ранжированию, обуславливается необходимость разработки методики построения многокритериальной функции важности, комплексно учитывающей предложенные варианты формализации задачи оценки важности сложных объектов военного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвак Б. Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа. - М.: Радио и связь, 1982. - 184 с., ил.

2. Подивинский В.В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия. - В кн.: Многокритериальные задачи принятия решений / Под ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянова.- М.: Машиностроение, 1978.

3. Фишберн П. К. Теория полезности для принятия решений: Пер. с англ. /Пер. В. Н. Воробьевой, А. Я. Кируты. - М.: Наука, 1978.