

Д.С. ЧИРОВ, О.Г. ЧЕРТОВА, Т.Н. ПОТАПЧУК
**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА**

Чиров Д.С., Чертова О.Г., Потапчук Т.Н. Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса.

Аннотация. В статье представлена методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса. Система технического зрения робототехнического комплекса рассматривается как совокупность двух подсистем: измерения и распознавания. Для реализации методики разработаны: методики расчетов частных критериев оптимальности для решения задачи обоснования технических требований и оценки области поиска оптимальных значений характеристик измерительных средств системы технического зрения робототехнического комплекса; рекурсивная процедура выбора оптимальных значений характеристик измерительного средства системы технического зрения робототехнического комплекса; схема компромисса для оценки оптимальных технических характеристик перспективных измерительных средств системы технического зрения робототехнического комплекса в различных технико-экономических концепциях.

Поиск оптимального решения производится по частным критериям: эффективность распознавания, стоимость и риск создания измерительного средства. Для построения рекурсивной процедуры на основе сформулированных допущений и утверждения синтезирован критерий, обеспечивающий поиск Парето-оптимальных решений. Разработанная методика при выборе решения из компромиссной области позволяет учитывать существующую (желательную) технико-экономическую концепцию создания робототехнического комплекса.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, системы технического зрения, распознавание, измерительные средства, методы оптимизации, компромиссные решения, рекурсивная процедура.

1. Введение. Вторая половина XX и начало XXI характеризуются бурным развитием робототехники. Именно появление роботов позволило совершить четвертую промышленную революцию [1]. Однако, современная робототехника не ограничивается исключительно промышленностью. С каждым годом все больше робототехнических комплексов (РТК) используется в военных и экстремальных задачах [2, 3, 4], в быту (автомобили-роботы, робот-уборщик) [5, 6], медицине [7] и других отраслях деятельности человека.

В данной статье речь пойдет о системе технического зрения (СТЗ) робототехнического комплекса. Эта система состоит из различных типов датчиков (измерительных средств) и комплекса распознавания [8-10], в качестве измерительных средств обычно используются телекамеры, тепловизоры, лазеры, радио- и ультразвуковые локаторы и т.д. Комплекс распознавания объектов по измерительной информации реализуются в виде программного

обеспечения для специализированной микроЭВМ или микропроцессоров. СТЗ обеспечивает как процесс восприятия окружающих объектов с помощью датчиков, так и их распознавание на основе полученной информации.

Очевидно, что при такой широкой номенклатуре измерительных средств их состав должен определяться на этапе проектирования РТК с учетом функционального назначения РТК и технико-экономических ограничений. В настоящее время в литературных источниках отсутствует единая методическая база для обоснования требований к СТЗ. Имеется ряд работ [11-17], решающих узкоспециализированные задачи по обоснованию требований к СТЗ.

В частности, в [11] представлена методика обоснования требований к основным показателям назначения СТЗ промышленного РТК (вероятности правильного распознавания и СКО измерения погрешности линейного и углового положения объектов). Методика [11] основана на блочно-иерархическом подходе к проектированию, но не дает представления о принципах построения алгоритмов оптимизации технических характеристик СТЗ при заданных показателях эффективности.

В [12] предложена оригинальная методика оптимизации системы технического зрения на базе трех камер. Для расчета оптимального сочетания параметров стереоскопической системы в работе предлагается использовать возможности генетических алгоритмов. В [13] рассмотрена задача построения СТЗ на базе однопозиционных модулей активного радиовидения. Принципы построения СТЗ для наземного РТК с использованием выносного беспилотного аппарата проанализированы в [14]. В [15] предложена комбинированная система технического зрения мобильных роботов на базе обзорной панорамной оптико-электронной системы. Декомпозиция СТЗ мобильного робота, разбитая на три подсистемы — телевизионная для прокладки маршрута, телевизионная объемного зрения и телевизионная для навигации, — представлена в [16]. В [17] предложен вариант системы технического зрения мобильных роботов с супервизорным сетевым управлением. Однако задача обоснования требований к СТЗ в общем виде в [11-17] не рассматривается.

В [18-22] рассматриваются различные алгоритмы обработки информации и принятия решения в системах машинного зрения с конкретными архитектурой и характеристиками.

Таким образом, в настоящее время отсутствует четкая методическая основа для формирования требований к СТЗ РТК как системы «средства измерения — распознавания». В тоже время

существует ряд исследований, направленных на создание методического аппарата обоснования характеристик информационных систем в других областях [23-27]. В данной статье делается попытка расширить имеющийся у авторов статьи задел [28-29] на актуальную задачу формирования требований к СТЗ РТК.

2. Формализация задачи. Совокупность задач распознавания объектов СТЗ РТК можно формально представить вектором $\mathbf{R} = (R_i)$ решаемых задач, где R_i — i -я задача распознавания, $i=1\dots N$, N — количество задач распознавания. Распознавание объектов производится по совокупности разнотипных видов информации, получаемой измерительными средствами РТК \mathbf{G} . Условно данную информацию можно разделить на три класса:

- координатная измерительная информация — \mathbf{KI} ;
- некоординатная измерительная информация — \mathbf{NKI} ;
- априорная информация об объекте — \mathbf{AI} .

Полученная измерительным комплексом СТЗ РТК информация преобразуется для получения признаков распознавания \mathbf{P} . Далее принимается решение о классе (типе) объекта путем сравнения формализованного описания объекта (признаков \mathbf{P}) с формализованными описаниями отдельных классов в соответствии с принятым в процедуре сравнения решающим правилом. Таким образом, процесс распознавания объектов СТЗ РТК можно представить в виде:

$$\mathbf{G} \rightarrow (\mathbf{KI}, \mathbf{NKI}, \mathbf{AI}) \rightarrow \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{R}. \quad (1)$$

При появлении новых измерительных средств \mathbf{G}' , позволяющих получать новые для РТК виды измерений \mathbf{KI}' и \mathbf{NKI}' , выражение (1) будет выглядеть как:

$$(\mathbf{G} + \mathbf{G}') \rightarrow (\mathbf{KI} + \mathbf{KI}', \mathbf{NKI} + \mathbf{NKI}', \mathbf{AI}) \rightarrow (\mathbf{P} + \mathbf{P}') \rightarrow \mathbf{R}. \quad (2)$$

В постановке (2) измерительный комплекс СТЗ РТК изменяется в части:

- новых тактико-технических требований к измерительным комплексам для получения информации;
- новых методов и алгоритмов предварительной обработки информации для формирования признаков распознавания \mathbf{P}' ;
- новых методов и алгоритмов распознавания объектов.

Причем изменения процесса распознавания объектов СТЗ РТК происходят при следующих ограничениях и условиях:

1. РТК обеспечивает решение своих функциональных задач по информации от существующих измерительных средств на определенном уровне. Изменение состава и характеристик измерительных средств СТЗ РТК должно обеспечивать повышение уровня решения задач, в том числе распознавания объектов, то есть:

$$f\{\mathbf{R}(\mathbf{G} + \mathbf{G}')\} > f\{\mathbf{R}(\mathbf{G})\}, \quad (3)$$

где f — функция оценки качества распознавания объектов СТЗ РТК.

Условие (3) введено с целью исключения ситуации, когда увеличение количества (или типов) измерительных средств СТЗ и их характеристик не приводит к повышению уровня решения задач распознавания. Хотя в большинстве случаев расширение номенклатуры измерительных средств СТЗ и улучшение их характеристик приводят к повышению вероятности распознавания объектов. В [30] показано, что за счет введения в состав СТЗ дополнительных измерительных каналов других спектральных диапазонов повышается вероятность распознавания объектов. В [12] повышение вероятности распознавания объектов стереоскопической СТЗ достигается за счет применения дополнительной ТВ-камеры.

2. Объектами наблюдения РТК являются объекты искусственного и естественного происхождения, а объектом анализа — окружающая обстановка. Количество и конструктивно-габаритные характеристики объектов наблюдения являются динамически изменяющимися параметрами во времени, то есть при построении процесса распознавания объектов необходимо учитывать динамику и полисценарность окружающей обстановки.

3. Для повышения эффективности распознавания объектов РТК требуются новые виды высокоинформативных измерений. Получение новых видов информации требует создания новых средств измерения, новых методов и моделей предварительной обработки и распознавания объектов по новым видам измерений. Причем средства получения измерений должны создаваться с учетом возможностей новых методов распознавания объектов.

Таким образом, общая постановка задачи обоснования технических требований к измерительным средствам СТЗ РТК заключается в следующем.

Пусть имеется измерительное средство СТЗ РТК g_i , принадлежащее множеству технически реализуемых измерительных средств G . Каждое средство описывается набором параметров

$g_i = \{\{p\}_i, \{x\}_i, \{r\}_i\}$, где $\{p\}_i$ — признак вида средства; $\{x\}_i$ — тактико-технические характеристики средства; $\{r\}_i$ — признаки вида информации получаемой средством i -го вида. Набор возможных векторов $\{x\}_i$ образует дискретное множество тактико-технических характеристик измерительных средств СТЗ РТК **X**.

Показателем технической реализуемости g_i определим технологический риск создания средства — μ_i . Под технологическим риском создания средства g_i будем понимать $\mu_i = 1 - P(g_i, t, C)$, где $P(g_i, t, C)$ — вероятность создания средства g_i стоимостью C в заданный период времени t .

Целью создания измерительного средства СТЗ РТК g_i определим повышение эффективности решения задачи распознавания объектов W робототехническим комплексом. Эффективность решения задачи распознавания объектов зависит от качества и полноты используемой информации и характеристик алгоритмов распознавания.

Под эффективностью решения задачи распознавания объектов W будем понимать соответствие РТК требованиям технического задания в части характеристик распознавания.

Создание нового или модернизация существующего измерительного средства РТК может потребовать модернизации или создания новых алгоритмов распознавания, обеспечивающих решение задач распознавания объектов по информации от различных измерительных средств СТЗ РТК с эффективностью W .

Допустимые варианты подсистемы распознавания СТЗ (программ и алгоритмов) представим в виде дискретного множества $\{Y_\beta\}$, $\beta = 1, 2, \dots, \beta, \dots, \bar{\beta}$.

Анализ хода выполнения работ по созданию измерительных средств и подсистемы распознавания СТЗ РТК показывает, что принцип согласованности характеристик измерительных средств и параметров подсистемы распознавания СТЗ не всегда выполняем в силу ряда объективных причин. Данное обстоятельство приводит к возникновению потерь эффективности решения задач распознавания объектов. Основной причиной несогласованности характеристик g_i и параметров $\{Y_\beta\}$ является то, что требования к объему и качеству измерительной информации должны предъявляться с учетом возможностей и ограничений алгоритмов распознавания, реализованных в $\{Y_\beta\}$. В свою

очередь, оценить применимость и эффективность новых методов распознавания объектов возможно только с учетом поставляемого объема и качества измерительной информации от g_i . Таким образом, для каждого g_i необходимо определить соответствующие параметры $\{Y_\beta\}$, то есть рекурсия должна проводиться не только по характеристикам g_i , но и по параметрам $\{Y_\beta\}$.

Условия и ограничения создания измерительного средства СТЗ РТК заданы положениями D , включающими:

$W^{ТРЕБ}$, $W^{СУЩ}$ — требуемая и существующая эффективность решения задач распознавания объектов по измерительной информации от комплекса измерительных средств РТК;

μ_{max} — ограничения на максимальную величину технологического риска создания средства;

C_{lim} — ограничения на максимальную величину выделяемых ассигнований, привязанные к рассматриваемому временному периоду, на создание и модернизацию измерительных средств СТЗ РТК.

Таким образом, обоснование технических требований к измерительному средству СТЗ РТК может быть сведено к выбору из множества вариантов средств G такого варианта средства g_i , для которого некоторая целевая функция Q достигает экстремума. Отсюда задача обоснования технических требований представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} Q_1(g_i, \{Y_\beta\}) \rightarrow \max \\ Q_2(g_i) \rightarrow \max \\ Q_3(g_i) \rightarrow \max \\ \varphi_1(g_i, \{Y_\beta\}, V) \geq \Delta W, \\ \varphi_2(g_i) \leq C_{lim} \\ \varphi_3(g_i, t) \leq \mu_{max} \\ g_i \in G \end{cases} \quad (4)$$

где Q_1 — показатель эффективности решения задачи распознавания объектов РТК, Q_2 — показатель стоимости создания измерительного средства СТЗ РТК g_i , Q_3 — показатель технологического риска создания g_i с учетом ограничений:

φ_1 — средство должно обеспечивать повышение эффективности решения задач распознавания объектов по информации от комплекса измерительных средств СТЗ РТК не менее чем на $\Delta W = W^{ТРЕБ} - W^{СУЩ}$;

φ_2 — ограничение на максимальную стоимость средства;

φ_3 — ограничение на максимальный технологический риск создания средства;

средство должно быть технически реализуемо.

Многокритериальность задачи обоснования тактико-технических характеристик измерительного средства СТЗ РТК обусловлена следующими причинами:

— множественность тактико-технических требований, которые предъявляются к средству;

— необходимость обеспечения функциональной полноты показателей, конкретизирующих оптимальные свойства измерительного средства РТК при одновременной их физической наглядности.

Анализ проводимых работ по созданию измерительных средств СТЗ РТК показывает, что критерий эффективности решения задач распознавания является противоречивым по отношению к стоимости и технологическому риску создания средства g_i . Для решения оптимизационных задач такого типа хорошо себя зарекомендовали методы поиска Парето-оптимальных решений [31, 32], суть которых сводится к поиску эффективных точек и областей компромисса G_P , то есть областей, в которых нельзя улучшить ни один критерий, не ухудшив при этом остальные. Поскольку в эффективных точках векторный критерий оптимальности Q является не улучшаемым по всем частным критериям одновременно, то эти точки также называются не улучшаемыми решениями или оптимальными по Парето. Отсюда решением задачи (4) является нахождение точки g^{opt} , которая находится в области оптимальной по Парето, то есть $g^{opt} \in G_P$. В соответствии с принятым подходом решение исходной задачи (4) разбито на два последовательных этапа:

Этап 1. Определение подмножества средств G_P , оптимальных по Парето, и соответствующую ему область компромиссов D_k при соблюдении заданных ограничений.

Этап 2. Определение экстремума $Q^{opt} \in D_k$ в соответствии с выбранными коэффициентами компромисса k_1, k_2, k_3 и соответствующей ему точки g^{opt} .

В формализованном виде процесс обоснования тактико-технических требований к измерительным средствам СТЗ РТК включает последовательное решение следующих задач:

— оценка качества измерительной информации A , получаемой средством g_i с тактико-техническими характеристиками $\{x\}_i$ в целевой обстановке V , которая задается функционалом отображения:

$$f_1(g_i, V) \rightarrow A_i; \quad (5)$$

— оценка эффективности решения задачи распознавания объектов СТЗ РТК при вводе в ее состав измерительного средства g_i , обеспечивающего получение измерений с качеством A при заданных характеристиках подсистемы распознавания СТЗ $\{Y_\beta\}$:

$$f_2(g_i, A_i, \{Y_\beta\}) \rightarrow W_i; \quad (6)$$

— оценка стоимости измерительного средства g_i :

$$f_3(g_i) \rightarrow C_i; \quad (7)$$

— оценка технологического риска создания средства g_i :

$$f_4(g_i) \rightarrow \mu_i; \quad (8)$$

— формирование подмножества решений $\bar{g}^0 \in G$ оптимальных по Парето в соответствии с заданными ограничениями:

$$f_5(G, W, C, \mu) \rightarrow G_p; \quad (9)$$

— выбор из подмножества G_p оптимального с точки зрения выбранной технико-экономической концепции k измерительного средства g^{opt} с тактико-техническими характеристиками $\{x^{opt}\}_k$:

$$f_6(G_p, k) \rightarrow g^{opt}. \quad (10)$$

Функционалы $f_5(\dots)$ и $f_6(\dots)$ задают алгоритмы, а функционалы $f_1(\dots)$, $f_2(\dots)$, $f_3(\dots)$ и $f_4(\dots)$ описывают основные операции рекурсивного многопараметрического метода построения подмножества G_p .

Общий алгоритм обоснования технических характеристик измерительных средств СТЗ РТК можно представить в виде:

$$f_6 \langle f_5 [f_1(\dots) \rightarrow f_2(\dots) \rightarrow f_3(\dots) \rightarrow f_4(\dots)] \rangle \rightarrow g^{opt}. \quad (11)$$

Исходя из общей постановки задачи, для реализации метода обоснования технических требований к измерительным средствам СТЗ РТК разработаны:

— методики расчетов частных критериев оптимальности для решения задачи обоснования технических требований и оценки области поиска оптимальных значений характеристик измерительных средств СТЗ РТК;

— рекурсивная процедура выбора оптимальных значений характеристик измерительного средства СТЗ РТК;

— схема компромисса для оценки оптимальных технических характеристик перспективного измерительных средств СТЗ РТК в различных технико-экономических концепциях.

3. Методики расчетов частных критериев оптимальности.

Эффективность распознавания объектов Q_1 РТК носит вероятностный характер и представляется совокупностью вероятностей решения k -й задачи распознавания P_k на интервале времени ΔT . Оценку данных вероятностей целесообразно осуществлять с использованием штатного программного обеспечения СТЗ РТК, на котором предполагается установка измерительного средства.

Эффективность решения k -ой задачи распознавания объектов РТК представим в виде степени соответствия полученной вероятностной оценки \hat{P}_k и требуемой P_k^0 :

$$q_k = P_k^0 - \hat{P}_k, \text{ если } P_k^0 \geq \hat{P}_k, \quad (12)$$

$$q_k = 0, \text{ если } P_k^0 < \hat{P}_k.$$

Тогда общая оценка эффективности решения задачи распознавания объектов СТЗ РТК будет иметь вид:

$$Q_1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^N q_k}, \text{ если } \sum_{k=1}^N q_k \neq 0, \quad (13)$$

$$Q_1 = 1, \text{ если } \sum_{k=1}^N q_k = 0.$$

Таким образом, оценка эффективности задачи распознавания объектов СТЗ РТК будет характеризоваться коэффициентом $Q_1 \in 0..1$ и зависеть от степени соответствия вероятности решения каждой задачи распознавания заданному в техническом задании на РТК значению.

Стоимость создания измерительного средства СТЗ РТК $\hat{C}(\bar{g})$ имеет ограничения C_{\lim} на максимальную величину выделяемых ассигнований, привязанных к рассматриваемому временному периоду, на создание и модернизацию измерительных средств СТЗ РТК. Отсюда относительная оценка стоимости средства с характеристиками \bar{g} будет иметь вид:

$$Q_2 = \frac{C_{\lim} - \hat{C}(\bar{g})}{C_{\lim}}. \quad (14)$$

Выбор такого способа оценки критерия стоимости создания измерительного средства СТЗ РТК объясняется тем, что получаемый критерий носит безразмерный характер и $Q_2 \in 0..1$, что позволяет использовать единый масштаб при расчете критерия Q^{opt} , на этапе выбора оптимального решения в соответствии с выбранной схемой компромисса (блок 9 на рисунке 1).

Непосредственно расчет $\hat{C}(\bar{g})$ целесообразно осуществлять с использованием метода сопоставления аналогов. Суть данного метода заключается в оценке стоимости нового образца техники путем пересчета стоимости ближайшего к нему аналога $C_{ан}$ через коэффициенты новизны K_n и эффективности $K_{эф}$. Общая оценка стоимости средства \bar{g} с использованием метода сопоставления аналогов будет иметь вид [33]:

$$\hat{C}(\bar{g}) = C_{ан} \cdot K_n + C_{ан} \cdot K_{эф}. \quad (15)$$

В существующих ограничениях на решение задачи наиболее предпочтительным методом оценки технологического (проектного) риска создания измерительного средства СТЗ РТК является определение меры достижимости (реализуемости) заданных ТТХ \bar{g} .

Одним из эффективных методов оценки рисков создания сложной технической системы является метод «закрепленных шкал» [34]. Применительно к задаче оценки реализуемости

измерительного средства РТК с характеристиками \bar{g} данный метод можно представить как оценку вероятности технического успеха, получаемую с учетом весов частных факторов [34]:

$$Q_3(\bar{g}) = 0.54 \ln\{R(\bar{g})\} + 0.04, \quad (16)$$

где $R(\bar{g}) = \sum_{i=1}^N B_i \eta_i$ — итоговая оценка реализуемости в баллах, B_i — оценка i -го фактора реализуемости; η_i — вес i -го фактора. Выражение (16) является аппроксимацией изменения вероятности технического успеха (реализуемости) от бальной (экспертной) оценки реализуемости проекта.

Предлагаемые методики расчета частных критериев оптимальности обеспечивают расчет данных критериев с учетом ограничений на решение задачи: отсутствие конкретной детализации технических решений для реализации оцениваемых \bar{g} ; отсутствие данных о технологических возможностях предполагаемого исполнителя; недостаточность информации об имеющихся аналогах создаваемого измерительного средства СТЗ РТК. Применение экспертных оценок по фиксированным шкалам и аппроксимационные выражения позволяют проводить упрощенный, но адекватный расчет стоимости и технологического риска создания измерительного средства СТЗ РТК.

4. Рекурсивная процедура выбора оптимальных значений характеристик измерительного средства РТК. Анализ существующих методов показал, что для определения области поиска оптимальных характеристик измерительного средства СТЗ РТК целесообразно использовать метод кривых развития технических систем Альтшуллера [35]. Методика оценки области поиска значений характеристик измерительных средств СТЗ РТК представляется следующим образом:

- определение перечня технических характеристик средства g заданного типажа p_k ;
- формирование пар $\langle x_j \Rightarrow Z_j \rangle_t$ за предыдущий период времени T , где x_j — значение j -той технической характеристики, Z_j — реализующая данное значение технической характеристики технология, $t \in T$ — временной период, когда $x_j \Rightarrow Z_j : true$. Текущее значение x_j

принимается за нижнюю границу a_j области поиска оптимального значения j -й технической характеристики средства g типажа p_k ;

— оценка уровня развития K технологии Z_j , реализующей значение x_j в настоящий момент времени, с использованием S -функции, где [35]:

$$K = \frac{L}{(a + e^{b \cdot e^{-\beta \cdot t}})}, \quad (17)$$

где L, a, b, β — коэффициенты, определяемые по статическим данным; t — время;

— прогноз развития x_j с учетом уровня развития K ;

— прогнозное значение x_j принимается за верхнюю границ b_j области поиска оптимального значения j -й характеристики средства g типажа p_k .

Для разработки рекурсивной процедуры выбора оптимальных значений характеристик измерительного средства СТЗ РТК сформулированы следующие допущения и доказано утверждение:

Допущение 1: процедура выбора оптимальных значений характеристик измерительного средства СТЗ РТК g^{opt} должна осуществляться для каждого варианта подсистемы распознавания $\{Y_j\}$;

Допущение 2: для каждого варианта подсистемы распознавания СТЗ предполагается создание (модернизация) определенного типажа измерительных средств:

$$Y_j \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \{p\}^j \\ \{r\}^j \end{array} \right\}, \quad (18)$$

обеспечивающих получение определенных видов измерений $p_n \rightarrow \{r\}_n$;

Допущение 3: зависимость частных показателей эффективности от технических характеристик измерительного средства СТЗ РТК является монотонной функцией:

$$\forall x_k, y_k \in a_k \dots b_k \quad x_k > y_k \Rightarrow Q_j(x_k) \geq Q_j(y_k), \quad j = 1, 2, 3. \quad (19)$$

Допущение 3 о монотонности функции сформулировано исходя из следующих положений. На качественном уровне зависимость эффективности решения задачи распознавания от технических характеристик средств измерения известна: чем выше качество измерений (информативность, точность и т.д.), тем эффективней решение задач распознавания. Например, чем меньше значение разрешающей способности оптической системы, тем более детальным получается зарегистрированное изображение объекта, и соответственно, тем выше вероятность его правильного распознавания. Данный факт подтверждается как классическими трудами по распознаванию образов [36-38], так и современными исследователями [39-41] в различных прикладных областях. Как правило, эта зависимость имеет монотонный характер, исключение может составить случай, когда улучшение технических характеристик измерительного средства не приводит к повышению вероятности правильного распознавания и теоретически может привести к ухудшению результата из-за особенностей алгоритма распознавания. Однако, сделанные нами допущения 1 и 2, а также функция ограничения φ_1 позволяют избежать данной ситуации при решении поставленной задачи.

Аналогичные ограничения справедливы для показателей стоимости [33, 42, 43] и риска.

Вид таких функций можно описать квадратичным полиномом (квадратичными функциями) вида:

$$y = ax^2 + bx + c. \quad (20)$$

Исходя из принятого способа оценки векторного критерия оптимальности, целевая функция решаемой задачи представляет собой результат суммирования трех функций (частных критериев $Q_j(\bar{g})$). Таким образом, целевая функция является суммой трех квадратичных функций и, соответственно, сама является квадратичной или линейной (при $a_1 + a_2 + a_3 = 0$).

Производная в каждой точке функций частных критериев и итоговой целевой функции может быть представлена в виде касательной прямой:

$$y' = 2ax + b = kx + b, \quad (21)$$

где k характеризует скорость и направление изменения значения функции, при $k > 0$ — функция возрастает, $k < 0$ — убывает, x — одна тактико-техническая характеристика измерительного средства,

$x \in x_0 \dots x_N$. Просуммировав производные функций частных критериев эффективности в точке x_i с учетом знака коэффициента k каждой функции (для Q_1 коэффициент $k > 0$, а для Q_2 и Q_3 — меньше 0), получаем, что итоговая целевая функция возрастает при условии:

$$k_1 > -(k_2 + k_3)$$

или

$$\Delta Q_1^{(i)} > \Delta Q_2^{(i)} + \Delta Q_3^{(i)}. \quad (22)$$

Аналогичный вывод можно сделать в случае описаний функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ логарифмическим полиномом или линейной зависимостью. Отсюда можно сформулировать утверждение.

Утверждение: если функция $f(x)$ является суммой трех монотонных функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$, определенных на интервале $x \in [a, b]$, причем $f_1(x)$ — возрастающая, а $f_2(x)$ и $f_3(x)$ — убывающие, то $f(x)$ возрастает на интервале $x + \Delta x$, если:

$$\Delta f_1(x + \Delta x) > \Delta f_2(x + \Delta x) + \Delta f_3(x + \Delta x),$$

и убывает, если:

$$\Delta f_1(x + \Delta x) < \Delta f_2(x + \Delta x) + \Delta f_3(x + \Delta x),$$

а при:

$$\Delta f_1(x + \Delta x) = \Delta f_2(x + \Delta x) + \Delta f_3(x + \Delta x)$$

точка $x + \Delta x$ является точкой перегиба.

Исходя из сформулированных допущений и утверждения, *правило (критерий)* формирования области Парето-оптимальных решений G_p будет иметь вид:

$$\begin{cases} \Delta Q_1^{(i)} > \Delta Q_2^{(i)} + \Delta Q_3^{(i)} \\ \Delta Q_1^{(i)} \geq \Delta W \\ C(g_i) \leq C_{\text{lim}} \\ R(g_i) \leq \mu_{\text{max}} \end{cases}. \quad (23)$$

Правило (критерий) (23) проверки оптимальности решения используется в логическом блоке 6 рекурсивной процедуры расчета

оптимальных значений технических характеристик измерительного средства СТЗ РТК.

На рисунке 1 представлена процедура расчета оптимальных значений характеристик измерительного средства СТЗ РТК для конкретного варианта подсистемы распознавания.



Рис. 1. Процедура расчета оптимальных значений характеристик измерительного средства СТЗ РТК для конкретного варианта подсистемы распознавания

Характеристики подсистемы распознавания задаются в блоках 2 и 3 и не меняются в процессе расчета оптимальных значений характеристик измерительного средства. Результатом работы блока 3 являются оценки вероятностей решения задач распознавания \hat{P}_k СТЗ РТК с измерительным средством g_i . В блоках 4 и 5 производится расчет (оценка) частных критериев оптимальности в соответствии с (13), (14) и (16). Полученные оценки частных критериев проверяются в блоке 6 на соответствие (23). В случае если (23) выполняется, то измерительное средство g_i включается в область решений G_p , в противном случае происходит коррекция характеристик g_i в блоке 7. Коррекция характеристик g_i производится путем последовательного перебора возможных значений $\{x\}_i$. Так как g_i может удовлетворять (23) при различных значениях $\{x\}_i$, то после включения g_i в область решений G_p , перебор значений $\{x\}_i$ продолжается до исключения всех вариантов. В блоке 9 из сформированной области решений G_p выбирается оптимальное в заданной технико-экономической концепции решение g_{opt} .

5. Схема компромисса для оценки оптимальных ТТХ перспективного измерительных средств РТК. Выбор варианта решения (т.е. $g_{opt}(Y_j)$) из области G_p осуществляется исходя из схемы компромисса и зависит от квалификации эксперта.

Для повышения достоверности экспертных оценок выбраны схемы компромисса для различных концепций технико-экономической политики, используемых для создания сложных технических систем [28, 31, 44-46].

Предложенная схема (рисунок 2) позволяет организовать систему поддержки решения при выборе экспертом схемы компромисса для нахождения оптимального решения из области G_p .

На рисунке 2 представлены два варианта технико-экономической политики заказчика. Первый вариант — поддержание РТК на должном уровне и недопущение критического отставания от конкурентов. При этом варианте технико-экономической политики заказчик при минимальных финансовых затратах и технологическом риске хочет получить минимально достаточный для выполнения своих задач технический результат. При этом варианте политики значимость частных критериев может быть одинакова, то есть $w_1 = w_2 = w_3$, или

частные критерии стоимости и риска будут являться более значимыми, чем частный критерий эффективности. В этом случае в блоке 9 рисунка 1 целесообразно использовать лексикографическую схему компромисса, схему последовательных уступок или схему на основе линейной свертки [44-46].

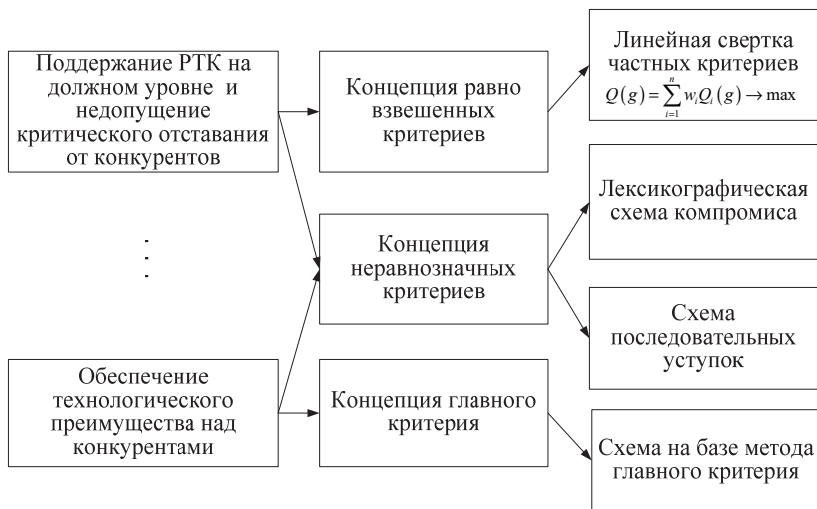


Рис. 2. Схема выбора компромисса при решении задачи оптимизации в зависимости от концепции технико-экономической политики

Второй вариант политики — обеспечение технологического преимущества над конкурентами. В этом варианте частный критерий эффективности является наиболее значимым. Поэтому в блоке 9 целесообразно использовать схемы на базе метода главного критерия [44-46], последовательных уступок или лексикографическую схему.

Во всех вариантах политики, в том числе и в комбинированных, конкретные значения коэффициентов важности частных критериев w_1, w_2, w_3 выбираются исходя из требуемых соотношений между ценой, риском и эффективностью. Наиболее универсальными являются лексикографическая схема и схема последовательных уступок.

6. Заключение. Робототехника является активно развивающейся отраслью науки и техники. Система технического зрения — одна из ключевых систем любого робототехнического комплекса. Ошибки при формировании требований к СТЗ могут привести к низкой эффективности РТК или к необоснованному повышению стоимости

этой системы. Анализ существующих работ в этой области позволяет утверждать, что единый подход к обоснованию требований к СТЗ РТК как системе «средства измерения — распознавание» не рассмотрен.

Проведенные исследования показали, что для формирования требований к измерительным средствам СТЗ РТК целесообразно использовать метод на основе рекурсивной многокритериальной оптимизации, заключающийся:

— в двухэтапной процедуре сужения области поиска оптимальных значений характеристик измерительного средства СТЗ РТК на основе математического аппарата прогнозирования параметров технических систем и формирования области компромиссных решений с использованием новых синтезированных: критерия, допущений и утверждения;

— в выборе из сформированной области поиска оптимального решения с учетом схемы компромисса, соответствующей заданной концепции техническо-экономической политики заказчика.

Разработанный методический аппарат планируется использовать при формировании требований к СТЗ РТК специального и двойного назначения.

Литература

1. Колесников Н.Е., Кошелева Т.Н. Промышленные роботы и их комплексы как важнейшая форма высокопроизводительных рабочих мест // Экономика и управление. 2014. № 10(108). С. 29–32.
2. Хрипунов С.П., Благодаряцев И.В., Чиров Д.С. Военная робототехника: современные тренды и векторы развития // Тренды и управление. 2015. № 4. С. 410–422.
3. Латиов В.С. и др. Перспективы разработки автономных наземных робототехнических комплексов специального военного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1(174). С. 156–168.
4. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Том 60. № 3. С. 147–165.
5. Ермишин К.В., Ющенко А.С. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3(12). С. 3–9.
6. Mohameda Z., Capi G. Development of a New Mobile Humanoid Robot for Assisting Elderly People // Procedia Engineering. 2012. vol. 41. pp. 345–351.
7. Сенчик К.Ю., Харламов В.В., Грязнов Н.А., Лопота А.В. О перспективах применения робототехники в медицине // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 40–43.
8. Мошкин В.И., Петров А.А., Титов В.С., Якушенков Ю.Г. Техническое зрение роботов // М.: Машиностроение. 1990. 272 с.
9. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение // Бинум. 2006. 752 с.
10. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M. The real time Vision System for small-sized target tracking // Int. J. Computing Science and Mathematics. 2007. vol. 1. no. 1. pp. 115–127.

11. *Колочкин В.Я., Нгуен К.М.* Методика обоснования требований к системам технического зрения промышленных робототехнических комплексов // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. №7. С. 198–205.
12. *Егоров И.В., Лачугин Д.В.* Оптимизация параметров системы технического зрения на базе трех камер // Вестник СГТУ. 2012. № 1(64). Вып. 2. С. 393–397.
13. *Клоков А.В., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Юрченко В.И.* Разработка системы технического зрения для роботов на основе радиовидения с использованием фокусирующих линз Люнеберга // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 2(45). С. 130–140.
14. *Аникин В.А. и др.* Облик выносной системы технического зрения на базе БЛА для робототехнических мобильных наземных комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №3(152). С. 70–77.
15. *Волосатова Т.М., Марченков А.М., Чичварин Н.В.* Разработка комбинированной системы технического зрения мобильных роботов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2016. С. 355–358.
16. *Михайлов Б.Б.* Техническое зрение мобильных роботов // Труды научно-технической конференции-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильного объекта-2010». 2010. Вып. 4. С. 191–201.
17. *Андреев В.П., Пряничников В.Е.* Системы технического зрения мобильных роботов с супервизорным сетевым управлением // Механика, управление и информатика. ИКИ РАН. 2012. №8. С.58–61.
18. *Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В.* Перспективы интеллектуализации систем управления ЛА за счет применения технологий машинного зрения // Труды МФТИ. 2009. Том 1. №4. С. 164–181.
19. *Tao L, Matuszewski B.J.* Robust deformable shape reconstruction from monocular video with manifold forests // Machine Vision and Applications. 2016. vol. 27. Issue 6. pp 801–819.
20. *Pu Y.-R., Chen Y.-J., Lee S.-H.* Fire recognition based on correlation of segmentations by image processing techniques // Machine Vision and Applications. 2015. vol. 26. Issue 7. pp 849–856.
21. *Cubero S. et al.* Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables // Food and Bioprocess Technology. 2011. vol. 4. Issue 4. pp 487–504.
22. *Panfilov P.B., Korolev S.V.* Integration of 3D dynamic models being created by 3D machine vision system into telerobotics applications // Automation and Remote Control. 2011. vol. 72. Issue 5. pp 1102–1113.
23. *Полтавский А.В.* Оптимизация характеристик когерентных систем обнаружения объектов на основе имитационного моделирования // Двойные технологии. 2013. № 1(62). С. 43–49.
24. *Полтавский А.В.* Математическое моделирование в формировании облика сложной системы // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 175. С. 130–141.
25. *Губонин Н.С.* Оптимизация по Парето при проектировании сложных информационных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 4. С. 7–12.
26. *Денисов А.В.* Моделирование оптико-электронных систем космического назначения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 11. С. 882–889.
27. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем // М: Наука. 1968. 356 с.
28. *Чиров Д.С.* Методический подход к обоснованию технических характеристик комплексов радиомониторинга для решения задач распознавания источников радиоизлучения // Т-Comm. 2011. № 11. С. 85–87.

29. *Чиров Д.С., Терешонок М.В., Елсуков Б.А.* Метод и алгоритмы оптимизации технических характеристик комплексов радиомониторинга // Т-Comm. 2014. Т. 8. № 10. С. 88–92.
30. *Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю.* Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференции-семинара: КДУ. 2011. Вып. 4. С. 11–44.
31. *Подиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач // М.: Наука. 1982. 39 с.
32. *Ногин В.Д.* Принятие решения в многокритериальной среде: количественный подход // М.: ФизматИст. 2005. 144 с.
33. *Сорокин В.А.* Развитие методологии ценообразования как ключевая задача в повышении оснащенности Вооруженных Сил РФ вооружением, военной и специальной техникой // Вооружение и экономика. 2008. № 2(2). С. 19–31.
34. *Гольдштейн Г.Я.* Стратегический инновационный менеджмент: тенденции, технологии, практика: монография // Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2002. 179 с.
35. *Альмиуллер Г.С.* О прогнозировании развития технических систем // Баку. 1975. 12 с.
36. *Bennet C.A., Winterstein S.H., Kent R.E.* Image Quality and Target Recognition, Human Factors. 1967. vol. 9. pp. 5–32.
37. *Горелик А.Л., Скрипкин В.А.* Методы распознавания: 2-е изд. // М.: Высшая школа. 1984. 207 с.
38. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: пер. с англ. // М.: Мир. 1982. Кн. 2. 480 с.
39. *Тропченко А.А.* Методы повышения робастности распознавания в мультимодальных биометрических системах // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 20–23.
40. *Гулевиц С.П., Веселов Ю.Г., Прядкин С.П.* Описание изображений сложных наземных объектов в задаче распознавания образов // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. С. 239–260.
41. *Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чиров Д.С.* Распознавание видов цифровой модуляции радиосигналов с использованием нейронных сетей // Вестник Московского ун-та. Сер. 3. Физика и Астрономия. 2015. № 1. С. 23–28.
42. *Лиокумович Д.С., Силуянова М.В.* Планирование и управление производством при повышении качества и конкурентоспособности сложных технических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. № 3. Т. 8. С. 18–24.
43. *Дедков В.К.* Принципы формирования критериев и показателей эффективности функционирования сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 4. С. 3–8.
44. *Ногин В.Д.* Проблема сужения множества Парето: подходы к решению // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. №1. С. 98–112.
45. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения // М.: Радио и связь. 1981. 560 с.
46. *Штойер Р.* Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления, приложения // М.: Наука. 1982. 504 с.

Чиров Денис Сергеевич — д-р техн. наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательского испытательного центра (исследования создания робототехнических комплексов военного назначения), ФГБУ Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИЦ РТ МО РФ). Область научных интересов: распознавание образов и анализ сцен, высокоинформативные средства измерений, искусственные нейронные сети, системы

связи и передачи информации. Число научных публикаций — 102. den-chirov@yandex.ru; ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 119160; р.т.: +7(495)330-8809, Факс +7(495)330-8809.

Чертова Ольга Георгиевна — научный сотрудник, ФГБУ Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИЦ РТ МО РФ). Область научных интересов: системы связи и передачи информации, методы оптимизации сложных технических систем. Число научных публикаций — 6. olya-932007@yandex.ru; ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 119160; р.т.: +7(495)330-8809, Факс: +7(495)330-8809.

Потапчук Татьяна Николаевна — младший научный сотрудник, ФГБУ Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИЦ РТ МО РФ). Область научных интересов: теория вероятности, системы измерения, математическая статистика. Число научных публикаций — 2. gniizrt@mail.ru; ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 119160; р.т.: +7(495)330-8809, Факс: +7(495)330-8809.

D.S. CHIROV, O.G. CHERTOVA, T.N. POTAPCHUK
**METHODS OF STUDY REQUIREMENTS FOR THE COMPLEX
 ROBOTIC VISION SYSTEM**

Chirov D.S., Chertova O.G., Potapchuk T.N. Methods of Study Requirements for the Complex Robotic Vision System.

Annotation. The article presents a methodology for substantiation of requirements for the technical vision system of a robotic complex. A technical vision system of the robotic complex is viewed as a combination of two subsystems: measurement and recognition. To implement the methodology we developed methods for calculating partial optimality criteria for substantiation of the technical requirements and evaluation of search area of the optimal values of measuring instruments characteristics of the technical vision system of a robotic complex; a recursive procedure for choosing the optimal values of measuring instruments characteristics of the technical vision system; a scheme of trade-off for evaluating the optimal technical requirements for advanced measurement instruments of the technical vision system in different technical and economical conceptions.

The search for optimal solution is done according to partial optimality criteria: recognition efficiency, the cost and risks of creating measuring instruments. For creating the recursive procedure based on formulated assumptions and assertions, a criterion, which provides the search of Pareto-optimal solutions, was synthesized. The developed methodology takes into account the existing (more suitable) technical and economical conceptions of creating a robotic complex while choosing trade-offs.

Keywords: robotic complex, technical vision, recognition, measuring instruments, methods of optimization, trade-offs, recursive procedure.

Chirov Denis Sergeevich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, deputy head of research center, Chief Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defense. Research interests: pattern recognition and scene analysis, highly informative measuring instruments, artificial neural networks, communications systems and information transfer. The number of publications — 102. den-chirov@yandex.ru; 84/32, Profsojuznaya street, Moscow, 119160; office phone: +7(495)330-8809, Fax: +7(495)330-8809.

Chertova Olga Georgievna — researcher, Chief Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defense. Research interests: communication systems, information and communication technology, optimization techniques. The number of publications — 6. olya-932007@yandex.ru; 84/32, Profsojuznaya street, Moscow, 119160; office phone: +7(495)330-8809, Fax: +7(495)330-8809.

Potapchuk Tatiana Nikolaevna — junior researcher, Chief Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defense. Research interests: theory of probability, measurement systems, mathematical statistics. The number of publications — 2. gniizrt@mail.ru; 84/32, Profsojuznaya street, Moscow, 119160; office phone: +7(495)330-8809, Fax: +7(495)330-8809.

References

1. Kolesnikov N.E., Kosheleva T.N. [Industrial robots and their complexes as the most important form of high-performance workplaces]. *Jekonomika i upravlenie – Economics and Management*. 2014. vol. 10(108). pp. 29–32. (In Russ.).

2. Hripunov S.P., Blagodarjashhev I.V., Chirov D.S. [Military Robotics: modern trends and development vectors]. *Trendy i upravlenie – Trend and management*. 2015. vol. 4. pp. 410–422. (In Russ.).
3. Lapshov V.S. et al. [Prospects for the development of autonomous robotic systems ground special military]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2016. vol. 1(174). pp. 156–168. (In Russ.).
4. Motienko A.I., Ronzhin A.L., Pavljuk N.A. [Modern development of rescue robots: opportunities and principles of their application]. *Nauchnyj vestnik NGTU – Scientific Bulletin of NSTU*. 2015. Issue. 60. vol. 3. pp. 147–165. (In Russ.).
5. Ermishin K.V., Jushhenko A.S. [Collaborative mobile robots - a new stage of development of the service robotics]. *Robototehnika i tehničeskaja kibernetika – Robotics and Technical Cybernetics*. 2016. vol. 3(12). pp. 3–9. (In Russ.).
6. Mohameda Z., Capi G. Development of a New Mobile Humanoid Robot for Assisting Elderly People. *Procedia Engineering*. 2012. vol. 41. pp.345–351.
7. Senchik K.Ju., Harlamov V.V., Grjaznov N.A., Lopota A.V. [On the prospects of the use of robotics in medicine]. *Jekstremal'naja robototehnika: Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii* [Extreme Robotics: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Sankt-Peterburg: Izd-vo «Politehnika-servis». 2015. pp. 40–43. (In Russ.).
8. Moshkin V.I., Petrov A.A., Titov V.S., Jakushenkov Ju.G. *Tehničeskoe zrenie robotov* [The technical vision of robots]. M.: Mashinostroenie. 1990. 272 p. (In Russ.).
9. Shapiro L., Stokman Dzh. *Komp'juternoe zrenie* [Computer vision]. Binom. 2006. 752 p. (In Russ.).
10. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M. The real time Vision System for small-sized target tracking. *Int. J. Computing Science and Mathematics*. 2007. vol. 1. no. 1. pp. 115–127.
11. Koljuchkin V.Ja., Nguen K.M. [Methods of study requirements for the systems of technical vision of industrial robot systems]. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.Je. Bauman. Jelektron. Zhurn – Science and Education: Scientific Publication of BMSTU*. 2015. vol. 7. pp. 198–205. (In Russ.).
12. Egorov I.V., Lachugin D.V. [Optimization parameters vision system on the basis of the three cameras]. *Vestnik SGTU – Vestnik Saratov State Technical University*. 2012. vol. 1(64). no. 2. pp. 393–397. (In Russ.).
13. Klokov A.V., Jakubov V.P., Shipilov S.Je., Jurčenko V.I. [Development of a Technical Vision System for Robots Based on Radio-Wave Imaging Using a Luneburg Focusing Lens]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 2(45). pp. 130–140. (In Russ.).
14. Anikin V.A. et al. [Look remote vision system based on unmanned aircraft to land mobile robotic complexes]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014. vol. 3(152). pp. 70–77. (In Russ.).
15. Volosatova T.M., Marchenkov A.M., Chichvarin N.V. [Development of a combined vision system of mobile robots]. *Materialy Vserossijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii molodyh učenyh, aspirantov i studentov* [Proceedings of the scientific-technical conference of young scientists and students]. 2016. pp. 355–358. (In Russ.).
16. Mihajlov B.B. [Vision Systems Mobile Robots]. *Tehničeskoe zrenie v sistemah upravlenija mobil'nogo ob'ekta-2010: Trudy nauchno-tehničeskoj konferencii-seminara* [The technical vision of a mobile object management system-2010: Proceedings of the scientific and technical conference-workshop]. 2010. vol. 4. pp. 191–201. (In Russ.).
17. Andreev V.P., Prjanichnikov V.E. [Vision systems of mobile robots with the supervisory network management]. *Mehanika, upravlenie i informatika – Mechanics, Control and Informatics*. 2012. IKI RAN. vol. 8. pp.58–61. (In Russ.).

18. Zheltov S.Ju., Vizil'ter Ju.V. [Prospects for the intellectualization of aircraft control systems through the application of machine vision technology]. *Trudy MFTI – Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2009. vol. 1. no. 4. pp. 164–181. (In Russ.).
19. Tao L, Matuszewski B.J. Robust deformable shape reconstruction from monocular video with manifold forests. *Machine Vision and Applications*. 2016. vol. 27. Issue 6. pp. 801–819.
20. Pu Y.-R., Chen Y.-J., Lee S.-H. Fire recognition based on correlation of segmentations by image processing techniques. *Machine Vision and Applications*. November 2015. vol. 26. Issue 7. pp. 849–856.
21. Cubero S. et al. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. *Food and Bioprocess Technology*. 2011. vol. 4. Issue 4. pp. 487–504.
22. Panfilov P.B., Korolev S.V. Integration of 3D dynamic models being created by 3D machine vision system into telerobotics applications. *Automation and Remote Control*. 2011. vol. 72. Issue 5. pp. 1102–1113.
23. Poltavskij A.V. [Optimizing the performance of coherent detection systems objects based on simulation]. *Dvojnye tehnologii – Dual technology*. 2013. vol. 1(62). pp. 43–49. (In Russ.).
24. Poltavskij A.V. [Mathematical modeling of the formation of a complex system image]. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviacii – Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2012. vol. 175. pp. 130–141. (In Russ.).
25. Gubonin N.S. [Pareto optimization in the design of complex information systems]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika – Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2012. vol. 4. pp. 7–12. (In Russ.).
26. Denisov A.V. [Simulation of optoelectronic systems for space purposes]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2015. vol. 58. no. 11. pp. 882–889. (In Russ.).
27. Buslenko N.P. *Modelirovanie slozhnyh system* [Modeling of Complex Systems]. Moscow: Nauka. 1968. 356 p. (In Russ.).
28. Chirov D.S. [The methodical approach to the substantiation of the technical characteristics of the systems for radio monitoring solutions emitters recognition problems]. *T-Comm*. 2011. vol. 11. pp. 85–87. (In Russ.).
29. Chirov D.S., Tereshonok M.V., Elsukov B.A. [Method and algorithms for optimization of technical characteristics of radio monitoring systems]. *T-Comm*. 2014. vol. 8. no. 10. pp. 88–92. (In Russ.).
30. Vizil'ter Ju.V., Zheltov S.Ju. [Problems of vision systems in modern aircraft systems]. *Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija mobil'nymi ob'ektami-2010: Trudy nauchno-tehnicheskoy konferencii-seminara* [Vision Systems in mobile objects control systems 2010: Proceedings of the scientific and technical conference-seminar.]. M.: KDU. 2011. vol. 4. pp. 11–44. (In Russ.).
31. Podinovskij V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nye reshenija mnogokriterial'nyh zadach* [Pareto-optimal solutions for multiobjective problems]. Moscow: Nauka. 1982. 39 p. (In Russ.).
32. Nogin V.D. *Prinjatije reshenija v mnogokriterial'noj srede: kolichestvennyj podhod* [Decision-making in multicriteria environment: a quantitative approach]. M.: FizmatIsT. 2005. 144 p. (In Russ.).
33. Sorokin V.A. [Development of the methodology of pricing as a key task in improving the equipment of the Russian Armed Forces armament, military and special equipment]. *Vooruzhenie i jekonomika – Weapons and Economy*. 2008. vol. 2(2). pp. 19–31. (In Russ.).

34. Gol'dshtejn G.Ja. *Strategicheskij innovacionnyj menedzhment: tendencii, tehnologii, praktika: monografija* [The strategic innovation management: trends, technologies, practices]. Taganrog: Izd-vo TRTU. 2002. 179 p. (In Russ.).
35. Al'tshuller G.S. *O prognozirovanii razvitiya tehniceskikh sistem* [About forecasting the development of technical systems]. Baku. 1975. 12 p. (In Russ.).
36. Bennet C.A., Winterstein S.H., Kent R.E. Image Quality and Target Recognition, *Human Factors*. 1967. vol. 9. pp. 5–32.
37. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya*: 2-e izd. [Methods of recognition: 2nd edition]. M.: Vysshaja shkola. 1984. 207 p. (In Russ.).
38. Prjett U. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital Image Processing]. Moscow: Mir. 1982. vol. 2. 480 p. (In Russ.).
39. Tropchenko A.A. [Methods to improve the robustness of recognition in multimodal biometric systems]. *Izvestija VUZov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2014. Issue. 57. vol. 4. pp. 20–23. (In Russ.).
40. Gulevich S.P., Veselov Ju.G., Prjadkin S.P. [Description of complex images of ground objects in pattern recognition problem]. *Nauka i Obrazovanie. MGТУ im. N.Je. Baumana. Jelektron. Zhurn – Science and Education: Scientific Publication of BMSTU*. 2012. vol. 11. pp. 239–260. (In Russ.).
41. Adzhemov S.S., Tereshonok M.V., Chirov D.S. [Type recognition of the digital modulation of radio signals using neural networks]. *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 3. Fizika i Astronomija – Moscow University Physics Bulletin*. 2015. vol. 1. pp. 23–28. (In Russ.).
42. Liokumovich D.S., Silujanova M.V. [Planning and management of production while increasing the quality and competitiveness of complex technical systems]. *Jelektrotehniceskije i informacionnye komplekсы i sistemy – Electrotechnical Systems and Complexes*. 2012. vol. 3. Issue 8. pp. 18–24. (In Russ.).
43. Dedkov V.K. [The principles of the criteria and indicators of the functioning of complex technical systems]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem – Reliability & Quality of Complex Systems*. 2013. vol. 4. pp. 3–8. (In Russ.).
44. Nogin V.D. [Pareto set constriction problem: approaches to solving]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij – Artificial intelligence and decision-making*. 2008. vol. 1. pp. 98–112. (In Russ.).
45. Kini R.L., Rajfa X. *Prinjatje reshenij pri mnogih kriterijah: predpochtenija i zameshhenija* [Decision-making in many criteria: preference and substitution]. Moscow: Radio i svjaz'. 1981. 560 p. (In Russ.).
46. Shtojer R. *Mnogokriterial'naja optimizacija: teorija, vychislenija, prilozhenija* [Multicriterial optimization: theory, computation, applications]. Moscow: Nauka. 1982. 504 p. (In Russ.).