

# AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.872

Г.В. Анцев, А.К. Красников, Е.С. Новиков

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВМФ

**Анцев Георгий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. Генеральный директор – генеральный конструктор АО «Концерн «Моринсис-Агат». Имеет статьи, монографии, изобретения в области сложных информационных радиоэлектронных систем специального и гражданского назначения. [e-mail: gendirector@concern-agat.ru].

**Красников Анатолий Константинович**, доктор технических наук, профессор, окончил Московский инженерно-физический институт. Заместитель руководителя научно-методического центра подготовки и переподготовки кадров по научной работе АО «Концерн «Моринсис-Агат». Имеет статьи, монографии, изобретения в области системного анализа и синтеза информационно-управляющих систем специального назначения. [e-mail: cnti@concern-agat.ru].

**Новиков Евгений Станиславович**, доктор технических наук, профессор, окончил Московский инженерно-физический институт. Главный конструктор направления – руководитель научно-методического центра подготовки и переподготовки кадров АО «Концерн «Моринсис-Агат». Имеет статьи, монографии, изобретения в области аппаратного и математического обеспечения информационно-управляющих систем специального назначения. [e-mail: novikov-E.S@concern-agat.ru].

#### Аннотация

Работа посвящена методологическим аспектам создания специального математического обеспечения интегрированных систем управления (ИСУ) для кораблей военно-морского флота РФ [1–3]. С позиций системного анализа рассматривается проблема выработки управляющих решений для слабоструктурированных задач в сложных тактических ситуациях [4–7]. Обосновывается целесообразность разработки специальных математических моделей для анализа проблемных ситуаций, на основе разбора которых в дальнейшем появляется возможность более четко формулировать проблему выработки оптимальных (рациональных) управляющих решений. Приводятся примеры использования аналитических моделей предсказательного моделирования боевого противоборства при оценке качества ИСУ. Рассмотрены основные принципы и этапы методологии конструирования математических моделей слабоструктурированных задач, представляющих практический интерес. Предложены подходы к выбору системы критериев и показателей оценивания качества ИСУ. В работе используются методы: системного анализа, исследования операций, принятия решений, систем массового обслуживания, современных систем компьютерной математики.

Ключевые слова: методология, интегрированная система управления, математическая модель, система массового обслуживания, системный анализ.

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF DESIGNING NAVAL INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS

**Georgii Vladimirovich Antsev**, Candidate of Engineering, Associate Professor; graduated from the Leningrad Institute of Aviation Instrumentation; General Director – General Designer of Concern Morinformsystem-Agat JSC; an author of articles, monographs, inventions in the field of complex information radioelectronic systems of special and civil purposes. e-mail: gendirector@concern-agat.ru.

**Anatolii Konstantinovich Krasnikov**, Doctor of Engineering, Professor; graduated from Moscow Engineering Physics Institute; Deputy Head of the Training and Retraining Scientific-and-Methological Center of Concern Morinformsystem-Agat JSC; an author of articles, monographs, inventions in the field of system analysis and synthesis of special-purpose information and control systems. e-mail: cnti@concern-agat.ru.

**Evgenii Stanislavovich Novikov**, Doctor of Engineering, Professor; graduated from Moscow Engineering Physics Institute; Chief Issue Manager – Head of Training and Retraining Scientific-and-Methological Center of Concern Morinformsystem-Agat JSC; an author of articles, monographs, inventions in the field of special-purpose information and control systems hardware and software. e-mail: novikov-E.S@concern-agat.ru.

### Abstract

The paper is devoted to methodological aspects of the creation of a special software for integrated management systems (IMS) of the Russian Naval ships [1–3]. In the context of system analysis, the problem of developing control solutions for semistructured problems in complex tactical situations is considered [4–7]. The authors substantiate the value of special mathematical models development for the problem situations analysis. The ability to formulate the problem of optimal (efficient) control solutions generation more clearly is occurred on the basis of such analysis. The examples of using the analytical models of combat confrontation predictive modeling in information control system quality assessment are given. The basic principles and steps of the methodology for constructing mathematical models of semistructured problems of practical interest and the approaches to the choice of criteria and indicators of information control system quality assessment are proposed. The authors use the methods of system analysis, operations research, decision-making, queue systems, computer mathematics modern systems.

Key words: methodology, integrated management system, mathematical model, queue system, system analysis.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема выработки оптимальных (рациональных) управляющих решений при функционировании кораблей ВМФ с годами становится все более актуальной и сложной. Одним из главных инструментов, обеспечивающих выработку этих решений, являются интегрированные системы управления (ИСУ), которые решают широкий круг задач и осуществляют прием разновременной, разноточной и разнохарактерной информации о внешней обстановке, ее совместную комплексную обработку и отображение в интересах лица, принимающего решение (ЛПР), которым, как правило, является командир корабля.

Отечественные и зарубежные военные специалисты обоснованно считают [2], что дальнейшее существенное повышение качества боевого управления современными кораблями в различных тактических эпизодах можно получить, прежде всего, за счет обеспечения возможности критического анализа и выработки управляющих решений на основе достаточно полной и достоверной информации о возможной динамике развития тактической ситуации, которая во многих случаях может происходить в условиях различного вида противоборств (боевого, информационного) с другими системами.

Такую информацию теоретически можно оперативно получать на основе обработки результатов аналитического

моделирования, выполненного с использованием методологии системного анализа на специально разработанных математических моделях предсказательного моделирования для тактического эпизода, рассматриваемого как «слабо структурированная задача» [8, 9]. Такие модели должны выполнять функции специализированных информационных систем поддержки принятия решений (СППР) для ЛПР и быть полезным дополнением к уже ставшему традиционным математическому обеспечению ИСУ, которое, как правило, решает только хорошо структурированные задачи.

Далее в работе рассматриваются методологические аспекты оценивания эффективности функционирования ИСУ. На конкретных примерах показана методика построения и использования математических моделей боевого противоборства. В качестве примера рассматривается боевое противоборство средств воздушного нападения (СВН) и системы корабельной противовоздушной обороны (ПВО).

### Постановка задачи

Задано корабельное соединение, которое защищается системой ПВО, состоящей, для примера, из четырех зенитных ракетных комплексов (ЗРК), поражающих цели зенитными управляемыми ракетами (ЗУР). Источником информации об обнаруженных СВН для всех ЗРК является многоканальная радиолокационная станция (РЛС),

которая установлена на головном корабле. На корабельное соединение производится атака СВН (целей), которые состоят из противокорабельных ракет (ПКР). Предполагается, что поток СВН, входящих в зону действия системы ПВО, является случайным потоком с известным средним значением временного интервала между соседними СВН. Каждое СВН, входящее в зону действия системы ПВО, обстреливается, если физически имеется такая возможность, одним из ЗРК одной ЗУР. Если в процессе налета (прохождения зоны ПВО) какое-либо СВН не было уничтожено (это может произойти в том случае, если в процессе прохождения этого СВН зоны действия системы ПВО все ЗРК уже были заняты обстрелом других целей, или направленная на него ЗУР его не уничтожила, т. е. промахнулась), то это СВН после прохождения зоны действия ПВО производит нападение на корабль, где установлена РЛС, и уничтожает РЛС с некоторой априори известной вероятностью. Если при этом РЛС будет уничтожена, то в этом случае система ПВО изменяет свою структуру (деградирует), а эффективность ее функционирования становится равной нулю.

Требуется рассмотреть методологию построения математических моделей, дающих возможность оперативно выполнять аналитическое моделирование для количественного оценивания эффективности системы ПВО в задаваемых тактических эпизодах боевого противоборства СВН и ПВО. Предложить систему критериев и показателей оценки качества системы ПВО. Все показатели качества работы системы ПВО при этом должны быть представлены как функции времени в течение временного интервала налета СВН.

**МЕТОД РЕШЕНИЯ**

Процесс боевого противоборства систем СВН и ПВО носит ярко выраженный вероятностный характер. Поэтому при построении математических моделей в работе используются следующие методы: теории вероятностей, теории систем массового обслуживания (СМО), численного анализа [10].

В качестве математических моделей систем ПВО используются марковские модели многоканальных СМО типа «с отказами» и «обслуживание с ошибками», состоящие из однотипных каналов обслуживания.

Предполагается, что структура системы в процессе функционирования может изменяться под действием «агрессивных» заявок, которые не были обслужены (по-

лучили отказ в обслуживании на входе в систему) или обслужены с ошибкой (не уничтожены).

Методология конструирования моделей состоит из следующих последовательных этапов:

- Постановка задачи.
- Выбор структуры (схемы) СМО.
- Определение множества возможных дискретных состояний СМО в процессе ее работы.
- Построение размеченного графа переходов, характеризующего случайный процесс функционирования СМО.
- Формирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) для вычисления вероятностей нахождения СМО в каждом из возможных состояний.
- Решение системы ОДУ.
- Формирование показателей качества функционирования СМО.
- Вычисление и представление в удобном для восприятия и анализа графическом виде значений показателей эффективности функционирования системы.

При последующем изложении будут использоваться следующие обозначения:

$t$  – текущее значение времени;

$t_{вх}$  – значение временного интервала между двумя соседними заявками во входящем потоке заявок;

$t_{об}$  – время обслуживания заявки каналом обслуживания;

$M_{t_{вх}}$  – математическое ожидание величины  $t_{вх}$ ;

$M_{t_{об}}$  – математическое ожидание величины  $t_{об}$ ;

$\lambda$  – интенсивность входящего потока заявок ( $\lambda = 1 / M_{t_{вх}}$ );

$\mu$  – интенсивность обслуживания заявки каналом обслуживания ( $\mu = 1 / M_{t_{об}}$ );

$K$  – количество каналов обслуживания;

$\beta$  – приведенная плотность входящего потока заявок ( $\beta = \lambda / \mu K$ );

$T$  – временной интервал поступления заявок на вход СМО (время налета СВН);

$N$  – количество заявок, поступивших за интервал времени  $T$ ;

$S_0(t), S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t), S_5(t)$  – возможные состояния СМО в момент времени  $t$ ;

$P_y$  – вероятность обслуживания заявки каналом обслуживания без ошибки (вероятность уничтожения заявки-цели);

$P_d$  – вероятность деградации СМО (вероятность уничтожения РЛС прорвавшимся СВН);

$P_{отк}$  – вероятность того, что вновь пришедшая заявка получит «отказ» в обслуживании;

$P_{обсл}$  – вероятность того, что вновь пришедшая заявка будет принята к обслуживанию;

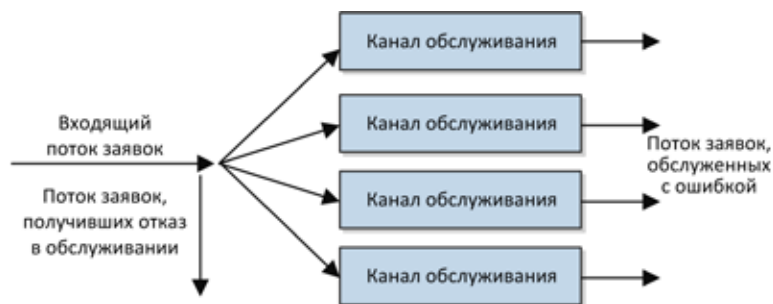


Рис. 1. Схема анализируемой СМО

$q$  – вероятность прохождения поступившего СВН не уничтоженным через систему ПВО;

$\lambda_{ab}$  – интенсивности переходов СМО из состояния «а» в состояние «b» (где  $a, b = \{0, 1, \dots, 5\}$ );

« := » – символ «присвоить значение»;

$W$  – вероятность отсутствия деградации системы.

Математическая модель системы ПВО представляется как СМО, схема которой представлена на рисунке 1.

На рисунке 1 представлена четырехканальная СМО «с отказами», на вход которой, начиная с момента времени  $t=0$  и до момента времени  $t=T$ , поступает входящий поток однотипных заявок. Поток заявок является стационарным пуассоновским потоком (простейшим потоком), интенсивность которого  $\lambda$  известна и равна  $\lambda=N/T$ . Каждая вновь поступившая заявка обслуживается (уничтожается) одним каналом с известной вероятностью  $P_y$ . Если поступившая на вход СМО заявка застала все каналы занятыми, т. е. получила отказ в обслуживании или не была уничтожена (т. е. обслужена с ошибкой) в процессе своего нахождения в СМО, то эта заявка нападает на систему управления всей СМО и уничтожает (выводит из строя) все каналы одновременно с некоторой априори известной вероятностью  $P_d$ . В случае уничтожения системы управления СМО полностью деградирует (система ПВО перестает выполнять свои функции).

Очевидно, что для рассматриваемой СМО не имеет смысла определять показатели эффективности ее функционирования для стационарного (установившегося) режима работы, т. к. такого режима просто не существует.

Обозначим следующим образом возможные состояния рассматриваемой СМО:

$S_0$  – система работоспособна, в системе нет заявок, все каналы свободны;

$S_1$  – система работоспособна, в системе одна заявка, один канал занят обслуживанием заявки;

$S_2$  – система работоспособна, в системе две заявки, два канала заняты обслуживанием двух заявок;

$S_3$  – система работоспособна, в системе три заявки, три канала заняты обслуживанием трех заявок;

$S_4$  – система работоспособна, в системе четыре заявки, четыре канала заняты обслуживанием четырех заявок;

$S_5$  – система неработоспособна (деградирована).

Размеченный граф переходов рассматриваемой четырехканальной СМО, которая может деградировать в процессе своего функционирования, представлен на рисунке 2.

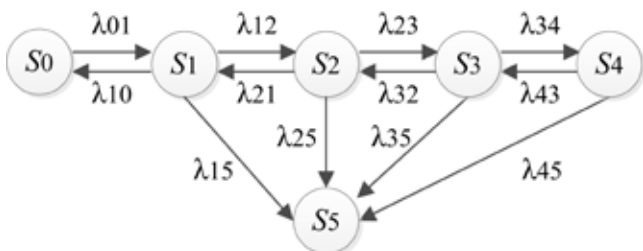


Рис. 2. Размеченный граф переходов четырехканальной деградирующей СМО

При последующем изложении используются следующие обозначения:

$P_0(t)$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_0$  в момент времени  $t$ ;

$P_1(t)$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_1$  в момент времени  $t$ ;

$P_2(t)$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_2$  в момент времени  $t$ ;

$P_3(t)$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_3$  в момент времени  $t$ ;

$P_4(t)$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_4$  в момент времени  $t$ ;

$P_5(t)$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_5$  в момент времени  $t$ .

В процессе аналитического моделирования указанные вероятности определяются при решении следующей системы ОДУ:

$$\begin{cases} \partial P_0(t)/\partial t = -\lambda_{01}P_0(t) + \lambda_{10}P_1(t), \\ \partial P_1(t)/\partial t = \lambda_{01}P_0(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{15})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t), \\ \partial P_2(t)/\partial t = \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{25})P_2(t) + \lambda_{32}P_3(t), \\ \partial P_3(t)/\partial t = \lambda_{23}P_2(t) - (\lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35})P_3(t) + \lambda_{43}P_4(t), \\ \partial P_4(t)/\partial t = \lambda_{34}P_3(t) - (\lambda_{43} + \lambda_{45})P_4(t), \\ \partial P_5(t)/\partial t = \lambda_{15}P_1(t) + \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{45}P_4(t). \end{cases} \quad (1)$$

Интенсивности переходов СМО из состояния в состоянии в соответствии с постановкой задачи вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \lambda_{01} &:= \lambda; \lambda_{10} := \mu P_y; \lambda_{12} := \lambda; \\ \lambda_{15} &:= \mu(1 - P_y)P_d; \\ \lambda_{21} &:= 2\mu P_y; \lambda_{23} := \lambda; \lambda_{32} := 3\mu P_y; \\ \lambda_{25} &:= 2\mu(1 - P_y)P_d; \lambda_{34} := \lambda; \\ \lambda_{43} &:= 4\mu P_y; \lambda_{35} := 3\mu(1 - P_y)P_d; \\ \lambda_{45} &:= 4\mu(1 - P_y)P_d + \lambda P_d. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия при решении системы (1) ОДУ:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0; P_4(0) = 0; P_5(0) = 0. \quad (3)$$

Система ОДУ (1) совместно с формулами (2) и начальными условиями (3) определяют математическую модель боевого противостояния СВН и системы ПВО.

Предлагаемые в работе показатели оценки динамики эффективности функционирования СМО:

- вероятности состояний системы как функции времени  $t$ , полученные в результате решения системы ОДУ (1);

- математическое ожидание числа занятых каналов  $M_K$ ;
- относительное число уничтожаемых целей в единицу времени  $q$ ;
- вероятность  $W$  отсутствия деградации системы к моменту времени  $t$ .

Эти показатели вычисляются по следующим формулам:

$$M_K := 1 \cdot P_1 + 2 \cdot P_2 + 3 \cdot P_3 + 4 \cdot P_4, \quad (4)$$

$$q := (\lambda_{10} \cdot P_1 + \lambda_{21} \cdot P_2 + \lambda_{32} \cdot P_3 + \lambda_{43} \cdot P_4) / \lambda, \quad (5)$$

$$W := 1 - P_5. \quad (6)$$

На рисунках 3–6 представлены примеры численного моделирования динамики результатов боевого противоборства при следующих исходных данных:

$$N := 20; T := 100 \text{ с}; \lambda := 0,2; M_{t_{\text{ВХ}}} := 5 \text{ с};$$

$$M_{t_{\text{Об}}} := 10 \text{ с}; \mu := 0,1; K := 4;$$

$$P_y := 0,6; P_d := 0,1; \beta := 0,5.$$

На рисунке 3 представлены вычисленные с помощью математического пакета Mathcad 15 зависимости вероятностей состояний рассматриваемой СМО от времени  $t$  на рассматриваемом интервале времени 0–100 секунд. На данном рисунке используются следующие обозначения:

$P_0$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_0$ ;

$P_1$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_1$ ;

$P_2$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_2$ ;

$P_3$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_3$ ;

$P_4$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_4$ ;

$P_5$  – вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_5$ .

На рисунке 4 показана вычисленная зависимость математического ожидания числа занятых каналов  $M_K$  от времени  $t$  на интервале времени 0–100 секунд.

На рисунке 5 представлена вычисленная зависимость величины  $q$  – вероятности прохождения поступившего СВН не уничтоженным через систему ПВО от времени  $t$  на интервале 0–100 секунд.

На рисунке 6 показана вычисленная зависимость величины  $W$  – вероятности отсутствия деградации СМО от времени  $t$  на интервале 0–100 секунд.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе методологические аспекты построения аналитических моделей предсказательного моделирования боевого противобор-

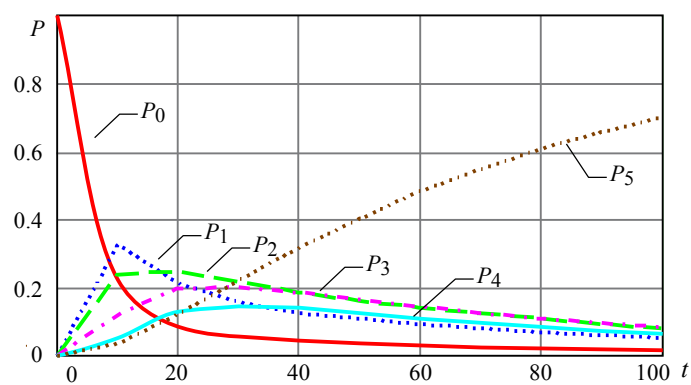


Рис. 3. Зависимости вероятностей состояний СМО от времени  $t$

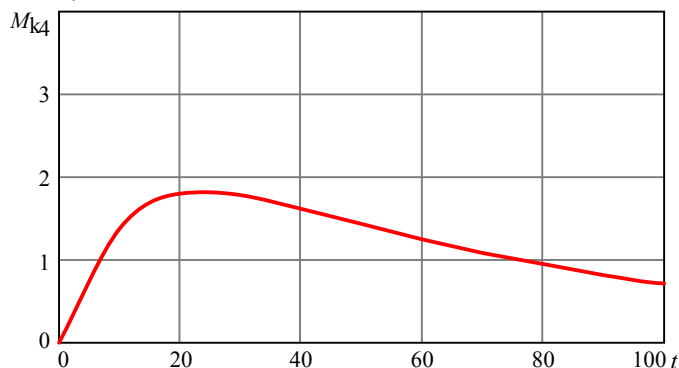


Рис. 4. Зависимость математического ожидания числа занятых каналов от времени  $t$

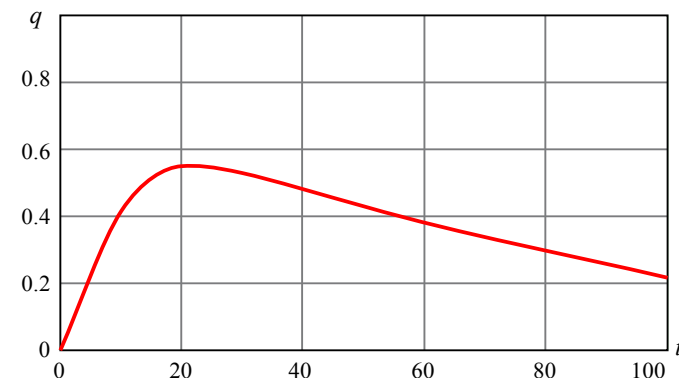


Рис. 5. Зависимость величины  $q$  (вероятности прохождения поступившего СВН не уничтоженным через систему ПВО) от времени  $t$

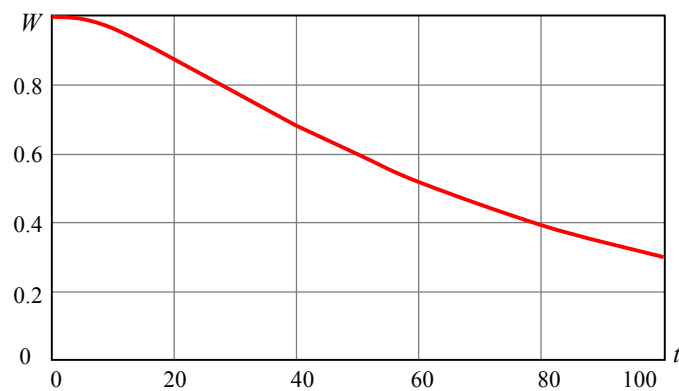


Рис. 6. Зависимость вероятности отсутствия деградации системы от времени  $t$

ства СВН и систем ПВО могут представлять интерес для специалистов, занимающихся разработкой математического обеспечения корабельных ИСУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красников А.К., Новиков Е.С., Щербаков Н.С. Система поддержки принятия решений при организации противовоздушной обороны корабельного соединения // Вестник воздушно-космической обороны. – 2014. – Вып. 2 (2). – С. 77–81.
2. Красников А.К., Щербаков Н.С. Системы массового обслуживания с деградацией // Вестник воздушно-космической обороны. – 2015. – Вып. 2 (6). – С. 112–116.
3. Высокие технологии в США: Опыт министерства обороны и других ведомств / Д.О. Рогозин [и др.]. – М. : Издательство Московского университета, 2013. – 384 с.
4. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений : учеб. пособие. – М. : Проспект, 2010. – 176 с.
5. Рузавин Г.И. Методология научного познания : учеб. пособие для вузов. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2009. – 287 с.
6. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях : пер. с англ. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с.
7. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ : учеб. пособие. – М. : КНОРУС, 2010. – 224 с.
8. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М. : Советское радио, 1972. – 552 с.
9. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с.
10. Дьяконов В.П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. – М. : Горячая линия–Телеком, 2007. – 985 с.

## REFERENCES

1. Krasnikov A.K., Novikov E.S., Shcherbakov N.S. Sistema podderzhki priniatiia reshenii pri organizatsii protivovozdushnoi oborony korabelnogo soedineniia [Decision Making Support System in the Time of the Air Defense Organizing of the Ship Uniting]. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoi oborony* [Aerospace Defense Herald], 2014, iss. 2 (2), pp. 77–81.
2. Krasnikov A.K., Shcherbakov N.S. Sistemy massovogo obsluzhivaniia s degradatsiei [Queueing Systems with Degradation]. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoi oborony* [Aerospace Defense Herald], 2015, iss. 2 (6), pp. 112–116.
3. Rogozin D.O., Shermet I.A., Garbuk S.V., Gubinsky A.M. *Vysokie tekhnologii v SShA: Opyt ministerstva oborony i drugikh vedomstv* [High Technologies in the USA: The Experience of Department of Defence and Other Federal Agencies]. Moscow, Moscow University Press, 2013. 384 p.
4. Kozlov V.N. *Sistemnyi analiz, optimizatsiia i priniatie reshenii: ucheb. posobie* [System Analysis, Optimization, and Decision Making: Textbook]. Moscow, Prospekt Publ., 2010. 176 p.
5. Ruzavin G.I. *Metodologiya nauchnogo poznaniia. Ucheb. posobie dlia vuzov* [The Methodology of Scientific Cognition: University-and-College Textbook]. Moscow, YUNITI-DANA Publ., 2009. 287 p.
6. Saaty T.L. *Priniatie reshenii pri zavisimostiakh i obratnykh svyaziakh. Per. s angl.* [Decision Making with Dependence and Feedback. The Analytic Network Process]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2009. 360 p.
7. Tarasenko F.P. *Prikladnoi sistemnyi analiz. Ucheb. posobie* [Applied System Analysis. Textbook]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 224 p.
8. Venttsel E.S. *Issledovanie operatsii* [Operation Research]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 552 p.
9. Vishniakov Ia.D., Radaev N.N. *Obshchaia teoriia riskov. Ucheb. posobie dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii* [The Uniform Theory of Risk. Guide for Graduate Students]. Moscow, Akademia Press, 2008. 368 p.
10. Diakonov V.P. *Mathcad 11/12/13 v matematike. Spravochnik* [Mathcad 11/12/13 in Mathematics: Guide]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2007. 985 p.