

УДК: 623

**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ,
СПОСОБНЫХ УСПЕШНО ВЫПОЛНИТЬ КОМАНДУ НА ВЫХОД
ИЗ МЕСТ ПОСТОЯННОЙ ДИСЛОКАЦИИ
В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**TO THE QUESTION OF DETERMINING AND USING THE LAW OF DISTRIBUTION
OF THE NUMBER OF MOBILE OBJECTS THAT CAN SUCCESSFULLY EXECUTE
THE COMMAND TO LEAVE THE PLACES OF PERMANENT DISLOCATION
IN THE PROCESS OF DESTRUCTIVE INFLUENCES**

Академик РАРАН В.В. Василенко, Д.В. Лебедев, В.Б. Чернышев

4 ЦНИИ МО РФ

V.V. Vasilenko, D.V. Lebedev, V.B. Chernyshev

В статье рассмотрены особенности учёта характеристик группы однотипных подвижных объектов и вероятностно-временных характеристик траектор управления ими для определения закона распределения количества объектов, способных успешно выполнить команду на выход из мест постоянной дислокации, передаваемой в процессе разрушающих воздействий. Рассмотрен и проанализирован наиболее общий подход к получению искомого закона, основанный на дискретно-событийном моделировании рассматриваемых процессов. Приведены рекомендации по дальнейшему использованию полученных результатов при последующей оценке эффективности применения объектов в условиях противодействия.

Ключевые слова: модель разрушающих воздействий, техническая готовность, вероятностно-временные характеристики, доведение команды, временные задержки.

In the article the features of taking into account the characteristics of a group of uniform mobile objects and the probabilistic and temporal characteristics of the system of their combat control to determine the law of distribution of the number of objects that can successfully execute the command to leave the places of permanent dislocation, transmitted in the process of destructive impacts are considered. The most general approach based on discrete-event modeling is considered and analyzed. Recommendations are given on the use of the results obtained in the subsequent evaluation of the effectiveness of further use of mobile objects in counteraction conditions.

Keywords: destructive impact model, technical readiness, probabilistic-time characteristics, command delivery, time delays.

Введение

При оценке эффективности применения оружия в ответных действиях по причине отсутствия соответствующих моделей традиционно рассматриваются либо крайне малове-

роятная возможность получения команды во время, позволяющее осуществить выход всех объектов из под удара до начала разрушающих воздействий, либо наиболее неблагоприятный случай — доведения команды после окончания воздействия. В результате значительный коли-

чественный и качественный боевой потенциал оружия, заложенный в него для эффективного применения в ходе воздействия, не оценивается и, следовательно, не учитывается при принятии решений.

Достигнутые в настоящее время результаты в области расчётно-экспериментальной оценки вероятностно-временных характеристик трактов управления оружием позволили создать детальные модели их функционирования для получения законов распределения времени доведения команды, передаваемой в процессе разрушающих воздействий [1].

В то же время учёт этих результатов при оценке эффективности применения оружия в ходе воздействия по районам дислокации разработан недостаточно и базируется на основе свёртки средних оценок [2], не вполне корректно учитывающих особенности рассматриваемых процессов доведения команды и функционирования сохранившихся объектов в процессе её выполнения, а также их взаимозависимую сущность. Это, в свою очередь, не позволяет моделировать релевантные варианты пространственно-временной структуры применения оружия и оценивать вклад ряда оперативно-технических характеристик как системы управления, так и оружия в эффективность их применения в условиях воздействия средств поражения, в том числе системы противоракетной обороны (ПРО). Материалы настоящей статьи будут способствовать решению указанных проблемных вопросов.

Исходные положения и допущения

Рассматривается выполнение команды на выход из оборудованных мест постоянной дислокации (МПД) группой однотипных подвижных объектов в условиях одной или двух серий воздействий по району их размещения. При этом вторая серия может осуществляться после некоторого интервала времени после окончания первой. Для исключения взаимного влияния воздействий по соседним объектам они в каждой серии осуществляются «волной»: начинаются с крайних МПД объектов по некоторому случайному направлению (азимуту) и распространяются вдоль азимута с постоянной интенсивностью, последовательно захватывая МПД, расположенные на все больших рассто-

яниях от начальной точки. При воздействии по МПД находящийся там объект поражается с некоторой вероятностью (поражение при этом соседних объектов исключено), а объект, совершающий выход и находящийся в непосредственной близости к МПД, уничтожается гарантированно.

Команду на выход объекты могут получать по основному и резервному трактам управления. По основному тракту получение команды может происходить в случайные времена несколько раньше или несколько позже относительно воздействия по МПД в первой серии, но до начала второй серии воздействий по району. По резервному тракту получение команды происходит позже, чем по основному тракту, в случайные времена, в ходе и после второй серии воздействий. Вместе с тем, из-за помех, возникающих в условиях воздействия, отдельные объекты могут и не получить команды ни по одному из трактов управления. Дополнительная сложность рассматриваемой ситуации состоит в том, что МПД объектов являются элементами основного тракта управления и выполняют функцию ретрансляторов в сети доведения команды. Поэтому поражение любого МПД в ходе воздействий по району приводит к уменьшению связности сети и, соответственно, к постепенному снижению вероятностно-временных характеристик доведения команды [3].

Считается, что объект способен успешно выполнить полученную команду, если будучи технически готовым, он после выхода сможет удалиться на безопасное расстояние от МПД.

Выход объекта из МПД осуществляется с различными временными задержками, состав которых обусловлен временем получения команды. При получении команды объектом до воздействия по МПД задержка определяется только временем его оперативной готовности к началу движения. После воздействия обязательно реализуется задержка безопасности — временная блокировка выхода объекта, обусловленная опасными условиями обстановки вокруг МПД. Считается, что величина этой задержки выбрана таким образом, что после её истечения условия обстановки уже не будут опасными для движения объекта. Возможно также техническая задержка выхода, если объект после воздействия сохранился, но с вре-

менно пониженной технической готовностью. Продолжительность технической задержки включает возможность выхода сохранившегося объекта до второй серии воздействий.

Соотношение случайных моментов времени получения команды и воздействия по объекту при заданных временах оперативной и технической задержек, а также оптимальной продолжительности задержки безопасности определит результирующую задержку выхода и саму возможность выполнения объектами команды до начала, во время или после разрушающих воздействий по МПД.

Формулировка рассматриваемой задачи

Заданы:

N — число объектов в МПД и их связность;

P_H — техническая надёжность объектов;

P_C — вероятность сохранения объекта в МПД после однократного воздействия;

P_T — вероятность временного понижения технической готовности объекта, сохранившегося после воздействия по МПД;

T_P, T_T, T_B — продолжительность оперативной и технической задержек, а также задержки безопасности;

T_y — интервал времени, необходимый для удаления объекта на безопасное расстояние от МПД,

числовые характеристики модели воздействия в первой и второй сериях (математическое ожидание и дисперсия времени воздействия по МПД каждого объекта);

$F_i(t) = P(t_{d_i} < t)$ — функции распределения времени доведения команды до i -го объекта по резервному тракту управления.

Кроме этих данных имеется модель функционирования сети основного тракта управления, элементами которого являются МПД объектов, позволяющая при заданных исходной связности сети и временах поражения ее элементов моделировать времена доведения команды до сохранившихся объектов.

Требуется определить закон распределения двух случайных величин: количества подвижных объектов, способных успешно выполнить команду на выход из МПД в процессе разрушающих воздействий и времени этого выхода.

Основные положения решения задачи на основе дискретно-событийного моделирования рассматриваемых процессов

Искомый закон распределения определяется на основе специальной обработки выборки результатов, получаемых при моделировании рассматриваемых случайных процессов. В каждой итерации последовательно моделируются исходы основных ключевых событий и состояний объектов (сохранение, получение команды, возникновение технической задержки или задержки безопасности), и по нескольким критериям определяются возможность и время выполнения каждым объектом команды.

На первом этапе с использованием числовых характеристик модели воздействия в первой серии определяются конкретные времена $t_{в1_i}$ ($i = 1, \dots, N$) воздействия по МПД, а затем с использованием вероятности P_C моделируются события их сохранения (или поражения) [4, 5, 6, 9].

С помощью модели функционирования сети основного тракта моделируются времена $t_{до_i}$ доведения команды до каждого объекта ($i = 1, \dots, N$) с учётом полученной ранее динамики поражения МПД, как элементов данной сети [9, 10].

Критерием того, что i -ый объект способен успешно выполнить команду до первого воздействия, когда

$$t_{до_i} < t_{в1_i} - T_P - T_y,$$

является отрицательный исход моделирования возникновения отказа (с использованием вероятности P_H).

При этом время выполнения им команды $t_{вк_i}$ составит:

$$t_{вк_i} = t_{до_i} + T_P. \quad (1)$$

Критерием успешного выполнения команды объектом, находящимся в i -ом сохранившемся МПД, полученной по основному тракту между первым и вторым воздействиями является отрицательный исход моделирования возникновения технической задержки (с использованием вероятности P_T) и отказа (с использованием вероятности P_H).

При этом время выполнения команды этим объектом при условии:

$$t_{\text{в}_i} + T_{\text{б}} < t_{\text{до}_i}, \quad (2)$$

означающем, что ко времени получения команды по основному тракту задержка безопасности истекла, вычисляется, как и в случае до воздействия, по формуле (1). При невыполнении условия (2) время выполнения команды составит:

$$t_{\text{вк}_i} = t_{\text{в}_i} + T_{\text{б}} + T_{\text{п}}.$$

В результате в каждой итерации будет получена первая часть случайной неубывающей дискретной ступенчатой функции $M_{\text{вк}}(t)$ — количества объектов, выполнивших команду, в зависимости от текущего времени на интервале от начала доведения по основному тракту до момента

$$t_M = \begin{cases} t_{\text{от}} + T_{\text{п}}, & \text{если } t_{\text{от}} + T_{\text{п}} \geq t_{\text{в}_i} + T_{\text{б}} + T_{\text{п}}, \\ t_{\text{ов}} + T_{\text{б}} + T_{\text{п}}, & \text{если } t_{\text{от}} + T_{\text{п}} < t_{\text{ов}} + T_{\text{б}} + T_{\text{п}}, \end{cases}$$

где $t_{\text{от}}$ и $t_{\text{ов}}$ — соответственно времена окончания доведения команды по основному тракту управления и первой серии воздействий по району.

Одновременно в каждой итерации определяется совокупность номеров объектов $M_{\text{нк}}(t_M)$, сохранившихся после первого воздействия, но ещё не выполнивших команду ко времени t_M . Эта совокупность может включать группы объектов в трёх состояниях:

- с пониженным уровнем готовности (в технической задержке), получившие команду;
- с исходным уровнем готовности, не получившие команду;
- с пониженным уровнем готовности (в технической задержке), не получившие команду.

Эта совокупность используется в качестве исходных данных на втором этапе для определения дополнительного количества объектов, способных успешно выполнить команду на выход из МПД при её доведении по менее оперативному, но помехоустойчивому резервному тракту? в ходе и после второй серий воздействий.

Далее с использованием числовых характеристик модели воздействия во второй серии аналогичным образом моделируются конкретные времена воздействия $t_{\text{в}_2}$ по МПД объектов из

совокупности $M_{\text{нк}}(t_M)$ и события их сохранения (или поражения).

Для первой группы объектов из состава $M_{\text{нк}}(t_M)$ критерием успешного выполнения команды является отрицательный исход моделирования поражения МПД (с использованием вероятности $P_{\text{с}}$), возникновения технической задержки (с использованием вероятности $P_{\text{т}}$) и технического отказа (с использованием вероятности $P_{\text{н}}$). При этом время выполнения команды этими объектами составит:

$$t_{\text{вк}_i} = t_{\text{в}_i} + T_{\text{т}} + T_{\text{п}}.$$

С использованием соответствующей функции $F_i(t) = P(t_{\text{др}_i} < t)$ моделируются времена $t_{\text{др}_i}$ доведения команды до каждого объекта из второй и третьей групп из состава $M_{\text{нк}}(t_M)$ по резервному тракту управления.

Для второй группы объектов из состава $M_{\text{нк}}(t_M)$ с применением тех же критериев, что и для первого воздействия, определяются события и времена успешного выполнения ими команды, полученной по резервному тракту, до или после второго воздействия по МПД.

Однако в случае положительного исхода моделирования возникновения технической задержки (при отрицательных исходах остальных составляющих указанного критерия) объект из данной группы также сможет выполнить полученную по резервному тракту команду в момент времени

$$t_{\text{вк}_i} = t_{\text{в}_2} + T_{\text{т}} + T_{\text{п}}.$$

Для третьей группы объектов из состава $M_{\text{нк}}(t_M)$ критерием успешного выполнения полученной команды является отрицательный исход моделирования поражения МПД (с использованием вероятности $P_{\text{с}}$) и возникновения отказа (с использованием вероятности $P_{\text{н}}$). При этом время выполнения команды объектами этой группы при отрицательном исходе моделирования (с использованием вероятности $P_{\text{т}}$) повторного возникновения технической задержки после второго воздействия по МПД составит:

$$t_{\text{вк}_i} = \begin{cases} t_{\text{в}_i} + T_{\text{т}} + T_{\text{п}} & \text{при } t_{\text{др}_i} < t_{\text{в}_i} + T_{\text{т}}, \\ t_{\text{др}_i} + T_{\text{п}} & \text{при } t_{\text{др}_i} \geq t_{\text{в}_i} + T_{\text{т}}, \end{cases}$$

а при положительном исходе этого моделирования:

$$t_{BK_i} = \begin{cases} t_{B2_i} + T_T + T_{II} & \text{при } t_{DP_i} < t_{B2_i} + T_T, \\ t_{DP_i} + T_{II} & \text{при } t_{DP_i} \geq t_{B2_i} + T_T. \end{cases}$$

В результате будет сформирована вторая часть случайной неубывающей дискретной ступенчатой функции $M_{BK}(t)^{(k)}$ на интервале от начала доведения команды по резервному тракту до момента

$$t_{PM} = \begin{cases} t_{PT} + T_{II} & \text{при } t_{PT} > t_{OB2} + T_T, \\ t_{OB2} + T_T + T_{II} & \text{при } t_{PT} \leq t_{OB2} + T_T, \end{cases}$$

где t_{PT} и t_{OB2} — соответственно времена окончания доведения команды по резервному тракту управления и второй серии воздействий по району.

В случае, если рассмотренная дискретно-событийная модель вместе с моделью функционирования сети основного тракта будет интегрирована в модель более высокого уровня (применения оружия в ответных действиях), то для её потребностей, будет достаточно получаемых в каждой итерации времён $t_{BK}^{(k)}$ и функций $M_{BK}(t)^{(k)}$.

Однако больший практический интерес представляет последовательное проведение двумя коллективами пользователей оценки количества объектов, способных успешно выполнить команду в процессе воздействий, и эффективности их последующего применения. Для целей удобства обработки и последующего использования функций $M_{BK}(t)^{(k)}$ целесообразно, выбрав дискрет времени Δt и определив количество рассматриваемых при моделировании временных дискретов времени S , по формуле

$$S = \left\lceil \frac{t_{PM}}{\Delta t} \right\rceil + 1$$

преобразовывать их в ряд $M_{BK}(t)^{(k)}$, где s — порядковый номер дискрета времени $s = 1, 2, \dots, S$.

Тогда рассматриваемый в рамках сформулированной задачи закон распределения двух случайных величин (количества подвижных объектов, способных успешно выполнить команду, и

времени выполнения) также может быть представлен в дискретном виде [3]:

$$P(n, s), \quad n = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S, \quad (3)$$

где $P(n, s) = P(n, s | A)$ — условная вероятность события, что в s -ый дискрет времени ровно n объектов способны успешно выполнить команду (событие A — выполнение команды хотя бы одним объектом в любой дискрет времени).

Вероятности $P(n, s)$ определяются на основе обработки получаемых за K итераций моделирования случайных неубывающих рядов $M_{BK}(s)^{(k)}$ ($k = 1, \dots, K$) следующим образом:

$$P(n, s) = \frac{P^*(n, s)}{P(A)},$$

где

$$P^*(n, s) = \frac{\sum_{k=1}^K \delta_{M_{BK}(s)^{(k)} - M_{BK}(s-1)^{(k)}, n}}{K};$$

$$P(A) = \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S P^*(n, s);$$

$$n = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S; M_{BK}(0)^{(\forall k)} = 0;$$

$\delta_{M_{BK}(s)^{(k)} - M_{BK}(s-1)^{(k)}, n}$ — символ Кронекера;

$$\delta_{M_{BK}(s)^{(k)} - M_{BK}(s-1)^{(k)}, n} = \begin{cases} 1, & \text{если } M_{BK}(s)^{(k)} - M_{BK}(s-1)^{(k)} = n, \\ 0, & \text{если } M_{BK}(s)^{(k)} - M_{BK}(s-1)^{(k)} \neq n. \end{cases}$$

На рисунке приведён примерный вид дифференциального закона распределения двух случайных величин $P(n, s)$.

Полученный при предварительном согласованных общих исходных данных закон распределения (3) позволяет при последующей оценке эффективности применения объектов в условиях противодействия, уже не используя рассмотренную дискретно-событийную модель (вместе с моделью функционирования основного тракта доведения команды), непосредственно моделировать случайные ряды $M_{BK}(S)$ количества объектов, способных успешно выполнить команду в зависимости от времени, в первой серии воздействий, а также при необходимости и с учётом второй серии воздействий [7–10].

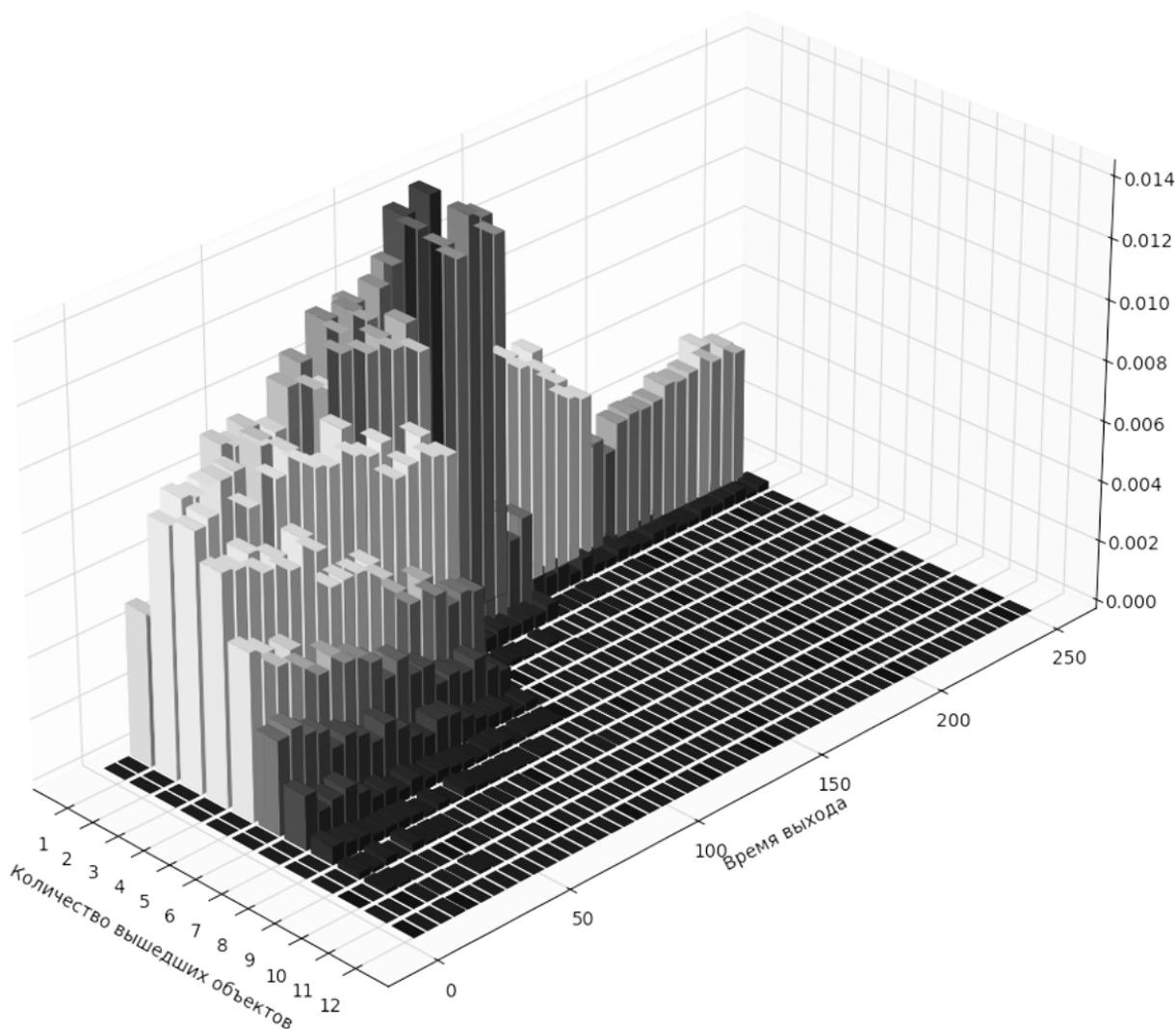


Рис. Дифференциальный закон распределения количества подвижных объектов, способных успешно выполнить команду, и времени выполнения (вариант)

В ряде практических задач, например, для сравнительной оценки путей повышения оперативно-технических характеристик системы боевого управления, достаточно вместо закона распределения (3) использовать рассчитываемые на его основе такие показатели, как среднее количество объектов, способных успешно выполнить команду к произвольному дискрету времени s :

$$M_{\text{БК}}(s) = P(A) \cdot \sum_{n=1}^N n \cdot \sum_{q=1}^s P(n, q),$$

$$n = 1, \dots, N; \quad q = 1, \dots, s; \quad s = 1, \dots, S, \quad (4)$$

или за любое интересующее число дискретов времени $[s_1, s_2]$:

$$\Delta M_{\text{БК}}(s_1, s_2) = P(A) \cdot \sum_{n=1}^N n \cdot \sum_{q=s_1}^{s_2} P(n, q), \quad (5)$$

$$n = 1, \dots, N; \quad q = s_1, \dots, s_2; \quad s = 1, \dots, S$$

Среднее количество объектов, способных выполнить команду за все время доведения (к дискрету времени S) можно определить из формулы (4), положив $s_1 = 1$, а $s_2 = S$.

Заключительные положения

Рассмотренная в рамках данной статьи задача и дискретно-событийная модель для однотипных подвижных объектов могут быть обобщены для группировки разнотипных объектов в разнесён-

ных по территории страны районах базирования. При этом, исходя из их географического местоположения, необходимо для каждого района дополнительно учесть корреляцию времён начала доведения команды по основному и резервному трактам управления (из единого центра и по общей централизованной сети связи), а также времён начала воздействия, согласовав их с общей моделью для территории в рамках рассматриваемого сценария. Получив в итоге искомые законы распределения для каждого района базирования, можно в дальнейшем проанализировать получающуюся пространственно-временную структуру (ПВС) выхода разнотипных объектов из МПД в ходе воздействия [11–15]. На основе анализа выработать и снова оценить организационно-технические мероприятия по совершенствованию системы и способов управления и применения объектов, направленные как на повышение количества объектов, успешно выполнивших команду, так и на формирование рациональной ПВС выхода, позволяющей успешно преодолевать попытки какими-либо мерами и способами противодействовать эффективному применению объектов.

Литература

1. Минко В.А., Ефремов Д.А., Чернышев В.Б. К вопросу поиска минимального времени доведения приказа в графе СБУ с учетом особенностей функционирования каналов связи // Сборник трудов 37-й Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». — Серпухов. 2019.
2. Ефремов Д.А., Козаков Г.В., Котышев Н.Н., Чернышев В.Б. Методические аспекты сопряжения систем оружия и информационно-управляющих систем в условиях воздействий // Стратегическая стабильность. — Королев. Академия военных наук. 2019. № 3 (88). С. 11–18.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Советское радио. 1973 г. 365 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: «Наука». 1978.
5. Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний. Физматлит. 1961.
6. Морз Ф., Кимпбелл Дж. Методы исследования операций. — М.: Советское радио. 1956.
7. Аверилл М. Лоу, В. Дэвид Кельтон. Имитационное моделирование. 3-издание. — СПб., Питер; — Киев. 2004.
8. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. — М. Мир. 1978.
9. Чуев Ю.В. Исследование операций в военном деле. — М.: Воениздат. 1970.
10. Ануреев И.И., Татарченко А.Е. Применение математических методов в военном деле. — М.: Воениздат. 1967.
11. Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2015. 305 с.
12. Управление подвижными объектами [Текст]: библиографический указатель отечественной и иностранной литературы 2009–2013 гг.: [в 3 вып.] / Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Российской акад. наук, Науч.-техническая б-ка; сост.: Сахабетдинова Л.А., Бабушкина Т.А. — Москва: ИПУ РАН. 2014.
13. Керков В.Г., Скабаров М.М. Методика комплексной оценки эффективности радиолокационной системы в условиях конфликтного противодействия // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». 2000. № 12. <http://jre.cplire.ru/win/dec00/1/text.html>
14. Филатов В.И., Борукаева А.О., Бердинов П.Г. Выборочный метод и параметры закона распределения выборки // Международный научный журнал «Инновационное развитие». 2019. № 3 (30). С. 33–36.
15. Турусов С.Н., Степанов И.В., Скороходов Д.А. Системы управления готовностью технических средств морских подвижных объектов / под общей ред. д-ра. техн. наук., проф. С.Н. Турусова. — СПб: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2019. 290 с.