

Научная статья
УДК 358.4+355.469.34]:355.463
DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)

МОДЕЛЬ АВИАЦИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МАРКОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Александр Владиславович Ананьев¹, Кирилл Сергеевич Иванников²,
Андрей Петрович Кажанов³✉

^{1,3}ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

²Научно-производственное предприятие «Радар ммс»,

Санкт-Петербург, Россия

kazhanov.a.p@mail.ru✉.

Аннотация. В статье проведен анализ существующих подходов к оценке эффективности способов применения авиационных средств поражения. Показано, что при оценке эффективности определение потребных нарядов может осуществляться как без учета, так и с учетом средств противовоздушной обороны противника, что в целом обоснованно. В то же время акцентировано внимание на том, что во многих источниках в случае использования вероятностного подхода, вероятность в моделях применения авиационных средств поражения принимается постоянной. Сложившееся положение дел не соответствует действительности, так

как по мере нанесения авиационных ударов с одной стороны экипажами авиационных комплексов производится коррекция промахов, с другой стороны, противоборствующая сторона наращивает противодействие за счет применения средств противовоздушной обороны, средств радиоэлектронной борьбы или вывода своих сил и средств из-под удара.

Для учета изменения оценки вероятности поражения объектов предложено использование нестационарных марковских случайных процессов. Учет изменения вероятности в циклах авиационных ударов заключается в представлении ее, как переменной величины, зависящей от времени, что является основным отличием предлагаемой модели от известных подходов.

Ключевые слова: рациональное применение, авиационное средство поражения, нестационарный марковский случайный процесс

Для цитирования: Ананьев А.В., Иванников К.С., Кажанов А.П. Модель авиационного поражения целей на основе нестационарных марковских случайных процессов // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)

MODEL OF THE AVIATION TARGET DESTRUCTION PROCESS BASED ON NON-STATIONARY MARKOV RANDOM PROCESSES

Alexander V Ananiev¹, Kirill S. Ivannikov², Andrey P. Kazhanov³✉

^{1,3}MESC Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin»,
Voronezh, Russia

²Joint-stock company «Scientific and production enterprise «Radar-mms»,

Saint Petersburg, Russia

kazhanov.a.p@mail.ru[✉].

Abstract. The analysis of existing approaches to the assessing effectiveness of the aviation destructive means application is carried out in the article. It was shown that during the assessing effectiveness required release determination can be carried out both without and with taking into account the means of enemy air defense, which is substantiated in general. At the same time, the attention is focused on the fact that in case of the probability approach employment in different calculations, the probability in models of aviation destructive means application is assumed to be constant in many sources. The current state of affairs is inconsistent, because as the air strikes are delivered, the error correction is done by the aviation complex crews on the one hand, and the opposing side increases the counteraction by air defense and electronic warfare application, or by withdrawal of the forces and equipment from the attack.

The application of a mathematical model based on non-stationary Markov random processes is proposed with the aim of efficient combat aviation application and taking into account the alterations in the defeat probability assessment. Considering the alteration probability in air strikes cycles in this case consists in its representation as a variable quantity depending on time, which is the main difference between the proposed model and known approaches.

In this article a new approach to the effectiveness assessment of the aviation destructive means application is proposed. That approach takes into consideration alternating the probability of different ground (sea) objects destruction during air strikes

cycles. Based on calculations of the obtained differential equations employing numerical methods the comparative analysis of the results acquired by using the known techniques and the new approach proposed was carried out. The account of the alteration probability is carried out by introducing a time dependence of probability, which allows determining required release of aviation destructive means, according to the alternating from cycle to cycle combat application conditions. The proposed mathematical models of the aviation target destruction process based on non-stationary Markov random processes, have significant universality and can be extended to a wide range of tasks.

Keywords: rational use, aircraft weapons, non-stationary Markov random process

For citation: Ananiev A.V., Ivannikov K.S., Kazhanov A.P. Model of the aviation target destruction process based on non-stationary Markov random processes. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)

Введение

Неизменным фактором организации применения авиационных средств поражения (АСП) является ограничение располагаемых ресурсов. При этом под ресурсами надо понимать самый широкий спектр составляющих: от летного состава, до авиационных комплексов, АСП, систем и средств связи, управления и подготовки полетов, аэродромной сети и ее объектов и т.д.. Важность рационального расхода ресурсов, используемых при организации применения АСП, подтверждается многочисленными исследованиями, посвященными, например, поиску рациональных параметров полета [1-4], рациональным условиям применения авиационных комплексов в районе действий [5-7] и в целом

планирования применения [8-10].

В части касающейся непосредственно рационального расхода АСП на основе идеи Козирацкого Ю.Л., был разработан способ высокоточного поражения объектов [11], заключающийся в последовательном уничтожении объектов по результатам контроля степени поражения n -м управляемым боеприпасом m -го объекта. Поражение очередного объекта осуществляется только после поражения предыдущего. Такой подход обеспечивает наиболее рациональный расход авиационных средств поражения, при этом возможен формальный учет противодействия систем противовоздушной обороны (ПВО) противника за счет изменения вероятности поражения одного объекта одним боеприпасом. Тем не менее, даже формальный учет ПВО противника в [11] не уменьшает его значимости и в боевых условиях, так как он может быть применен с разумной степенью осторожности в случае асимметричного противоборства с противником, у которого подавлена или отсутствует система противовоздушной обороны. В этих условиях оперативно-тактическая авиация может наносить удары с высот 5000-6000 метров вне досягаемости действия переносных зенитно-ракетных комплексов. Кроме того, даже формируя полноценные боевые порядки в составе пилотируемых (беспилотных) авиационных комплексов будут ударные группы тактического назначения (ГТН) и ГТН подавления ПВО на маршруте полета. В этом случае для ударной ГТН расчеты согласно [1] могут трактоваться как расчеты для полигонных условий и без учета вывода противником объектов из-под удара.

Можно считать, что развитием методик по определению рационального

варианта применения АСП в полигонных условиях, в том числе принимая во внимание работу [12], являются подходы, учитывающие противодействие противника с использованием систем ПВО, а также за счет вывода сил и средств из-под удара. При решении подобного рода задач в условиях принятия решений с полной неопределенностью исходных данных, единственно применимым является аппарат экспертных методов [12]. В источнике [12] предложен наиболее объективный с позиций системного подхода путь к разрешению исходной неопределенности: многокритериальный анализ, одним из параметров в котором предложено включить оперативность действий экипажей.

В случае, когда можно осуществить декомпозицию действий разведывательно-ударных групп на различные состояния, а также найти подходы к определению вероятностей переходов между состояниями, актуально применение графоаналитических методов [13-15]. Такие подходы объективно учитывают противодействие противника, использование средств радиоэлектронной борьбы и позволяют оценить вероятность выполнения боевой задачи в условиях временных ограничений. Однако, во многих работах, вероятность поражения объектов в циклах нанесения авиационных ударов принимается постоянной величиной. Сложившееся положение в методическом обеспечении позволяет констатировать факт отсутствия учета изменения вероятности поражения объектов при повторных заходах, в то время как, например, осуществляется коррекция промахов операторами комплексов разведки, управления и связи, работающими совместно с расчетами беспилотных летательных аппаратов.

Обобщая приведенные источники, можно утверждать: при организации применения АСП вероятность в циклах применения остается постоянной, что не соответствует действительности и обуславливает необходимость исследований, приведенных в статье.

Для учета нестационарности вероятности в ударных циклах и оценки результативности применения АСП, используем теорию случайных процессов [16, 17]. Также учтем, что влияние внешних факторов независимо друг от друга. Согласно [18], в целом случайный процесс при моделировании можно считать близким к марковскому.

Изначально рассмотрим ситуацию, когда имеется только одна цель, по которой наносятся последовательно удары, до момента ее уничтожения. В случае, если в результате авиационного удара цель не уничтожена по причине промаха, производится внесение поправки в координаты точки сброса АСП, вследствие чего вероятность ее поражения одним выстрелом меняется, а процесс поражения становится нестационарным. Обозначим через $P_v(t)$ вероятность поражения цели единичным выстрелом (сбросом АСП).

Зная, что случайный процесс модели близок к марковскому, то потоки событий, фигурирующие в нем, будут близкими к потокам Пуассона. Тогда можно считать, что вероятность поражения цели с учетом уточнения координат прицеливания P_v , как функция от времени t распределена по показательному закону [19], то есть имеет вид:

$$P_v(t) = 1 - \exp(-\lambda t), t \geq 0; \quad (1)$$

где λ - некоторый параметр, характеризующий степень (точность) уточнения координат прицеливания, который можно интерпретировать как обратное среднее время T_v , необходимое на уничтожение данной цели: $\lambda=1/T_v$. Таким образом, параметр λ можно интерпретировать как интенсивность потока поражения целей.

Введем следующие состояния случайного процесса:

S_0 – принятие решения о поражении данной цели (возможно, после поражения предыдущих целей или уточнения информации по данной), среднее время нахождения случайного процесса в данном состоянии обозначим через T_0 ;

S_1 – в результате нанесения удара по цели, она не поражена, происходит уточнение координат прицеливания и нанесение по ней следующего удара, среднее время нахождения случайного процесса в данном состоянии примерно равно среднему времени уточнения данных по цели и нанесения повторного удара, обозначим через T_1 ;

S_v – в результате нанесения удара цель поражена и начинается подготовка к поражению следующей цели.

С учетом этого, случайный процесс будет иметь граф состояний, изображенный на рисунке 1.

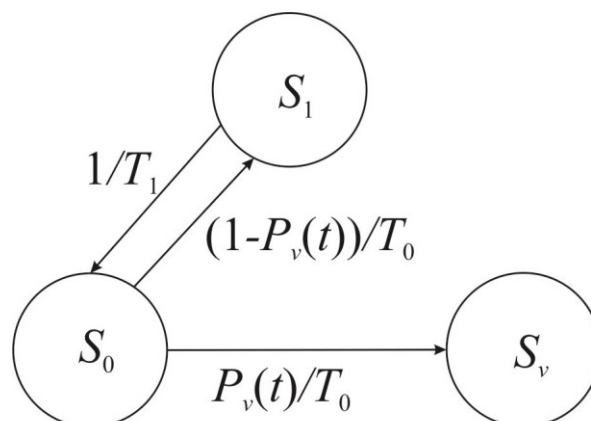


Рисунок 1 – Граф состояний случайного процесса

С использованием графа состояний, представленного на рисунке 1 и соотношения (1), система дифференциальных уравнений Колмогорова для рассматриваемого случайного процесса будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = \frac{P_1(t)}{T_1} - \frac{P_0(t)}{T_0}; \\ \frac{dP_v(t)}{dt} = \frac{(1 - \exp(-\lambda t))P_0(t)}{T_0}; \\ P_1(t) = 1 - P_0(t) - P_v(t); \\ P_0(0) = 1, P_1(0) = P_v(0) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

По результатам решения системы дифференциальных уравнений (2) с использованием численных методов, получены графики вероятности состояний (рисунок 2).

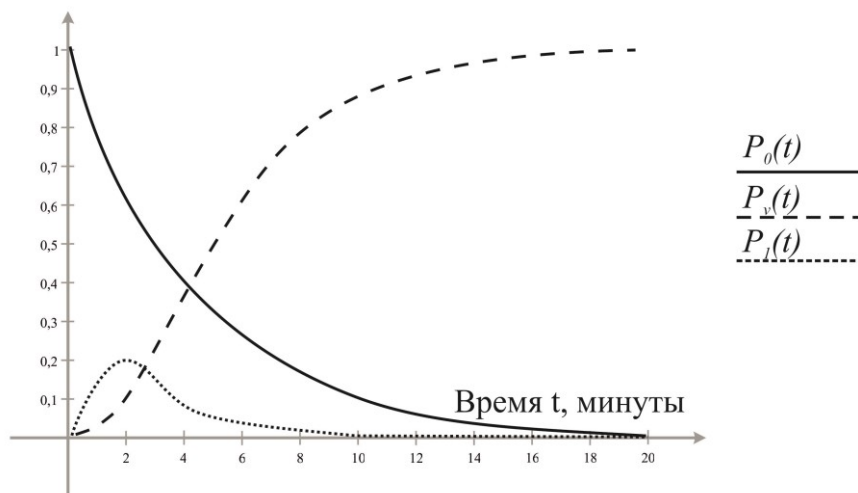


Рисунок 2 – Временные зависимости вероятностей состояний случайного процесса поражения одиночной цели при ($T_0=3$, $T_1=2$, $\lambda=0,5$)

Очевидно, что наиболее значимым с точки зрения описания последовательности поражения нескольких целей является состояние S_v , которое соответствует моменту начала поражения следующей цели. Как показал анализ

решения, на вероятность этого состояния $P_v(t)$ достаточно сильное влияние оказывает параметр λ . Графики зависимостей $P_v(t)$ для разных значений параметра λ приведены на рисунке 3.

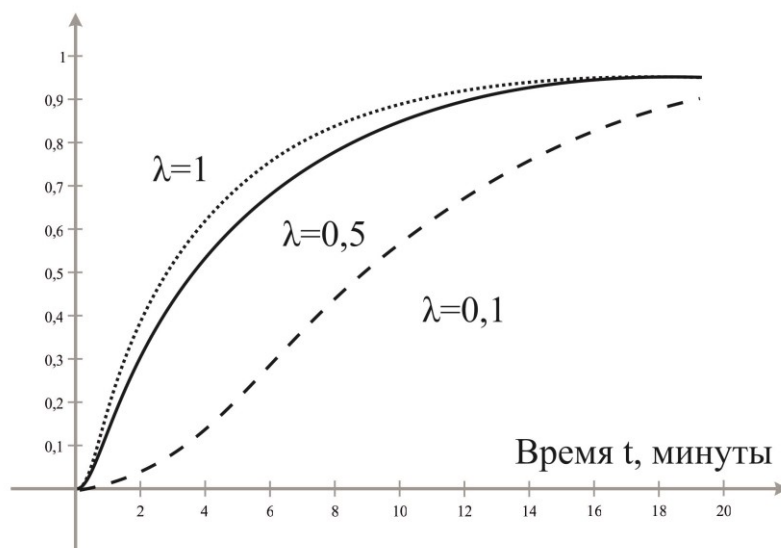


Рисунок 3 – Временная зависимость поражения одиночной цели $P_v(t)$ для разных значений параметра λ

Из рисунка 3 видно, что увеличение интенсивности поражения целей значительно повышает вероятности поражения одиночной цели для любого момента времени.

Перейдем теперь к ситуации, когда количество целей равно N . Будем учитывать следующие допущения, которые предполагает данная модель:

1. Переход к цели под номером k осуществляется после того, как предыдущие $k-1$ целей были уничтожены, то есть для вероятности поражения N целей рационально использовать формулой перемножения условных вероятностей [20];

2. Среднее время начала попытки поражения цели с номером k будет смещено на среднее время, необходимое на поражение предыдущих $k-1$ целей, а с учетом

того, что среднее время поражения одной цели $T_v=1/\lambda$, среднее время начала уничтожения цели с номером k равно $(k-1)/\lambda$.

С учетом этого, вероятность P_{vs} того, что за время t будут уничтожены N целей, можно определить формулой:

$$P_{vs}(N,t) = \prod_{k=1}^N P_v \left(S_f \left[t - \frac{k-1}{\lambda} \right] \right); \quad (3)$$

где $S_f(x) = \begin{cases} x, & \text{при } x \geq 0; \\ 0, & \text{при } x < 0. \end{cases}$

График этой вероятности от времени для разного числа имеющихся целей приведен на рисунке 4.

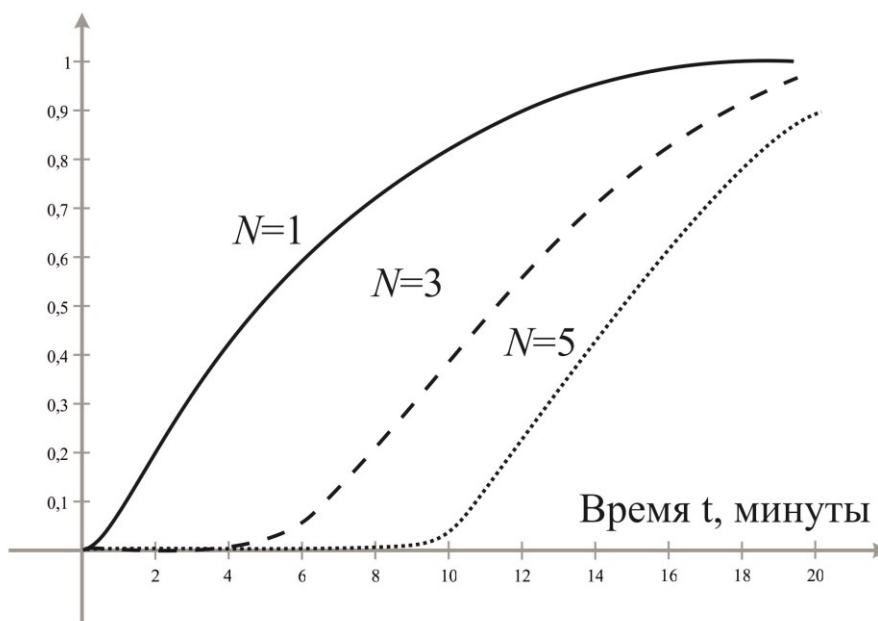


Рисунок 4 – Зависимость вероятности последовательного поражения N целей от времени при параметрах $T_0=3$, $T_I=2$, $\lambda=0,5$

Следует отметить, что если цели уничтожать не последовательно, а параллельно в случайном порядке, нанося удар по произвольной свободной цели, то формула (3) может быть заменена на следующую:

$$P_{vs}(N, t) = \prod_{k=1}^N P_v(t); \quad (4)$$

а ее график приведен на рисунке 5.

Видно, что равнозначные значения вероятности поражения N целей достигаются по времени быстрее, чем при последовательном поражении.

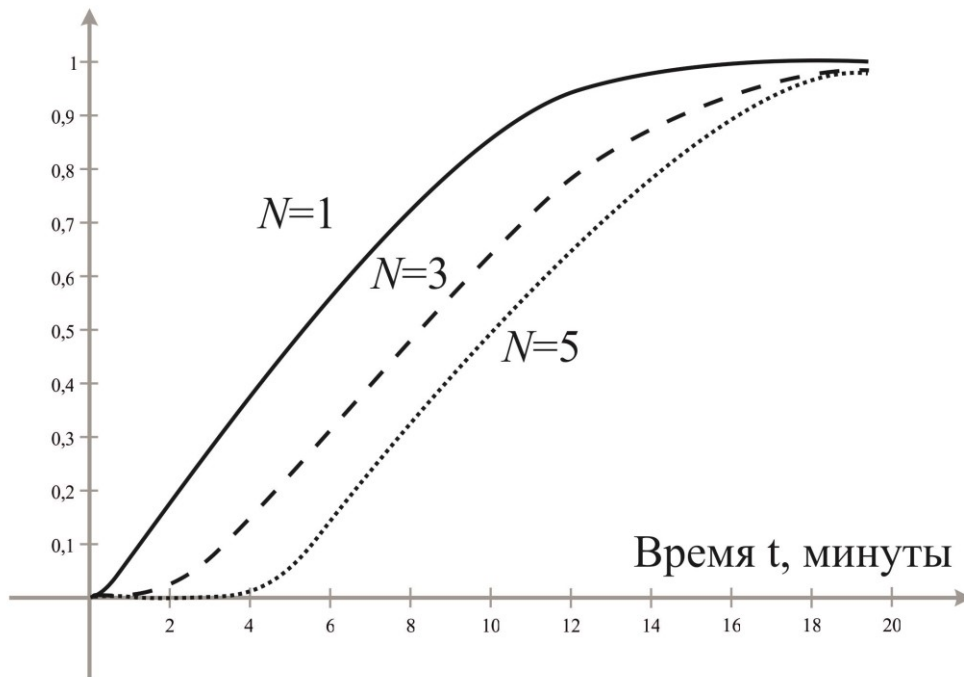


Рисунок 5 – Зависимость вероятности параллельного поражения N целей от времени при параметрах $T_0=3$, $T_l=2$, $\lambda=0,5$

Интересно проанализировать ситуацию, когда уточнение данных о цели для последующего нанесения удара при промахе не производится и вероятность поражения цели не меняется во времени, то есть остается постоянной и равной P_v .

Для сравнения условий поражения цели с корректировкой и без нее, подберем вероятность поражения цели при единичном ударе P_v так, чтобы среднее время поражения единичной цели $T_v=1/\lambda$ не изменилось. В таком подходе будет возможность реально оценить роль прицеливания. Если учесть то, что средняя

продолжительность цикла перед нанесением повторного удара составляет T_0+T_1 , то среднее количество циклов, в течении которых цель будет поражена N_v будет равно

$N_v = \frac{T_v}{T_0 + T_1}$ и при этом поражается ровно одна цель. Согласно формуле

математического ожидания при проведении повторных испытаний по схеме Бернулли [19], должно выполняться условие: $N_v P_v = 1$, что равносильно:

$$P_v = \frac{T_0 + T_1}{T_v} = \lambda(T_0 + T_1). \quad (5)$$

С учетом этого, можно посмотреть временные зависимости вероятности поражения цели при наличии корректировки и без нее, они изображены на рисунке 6.

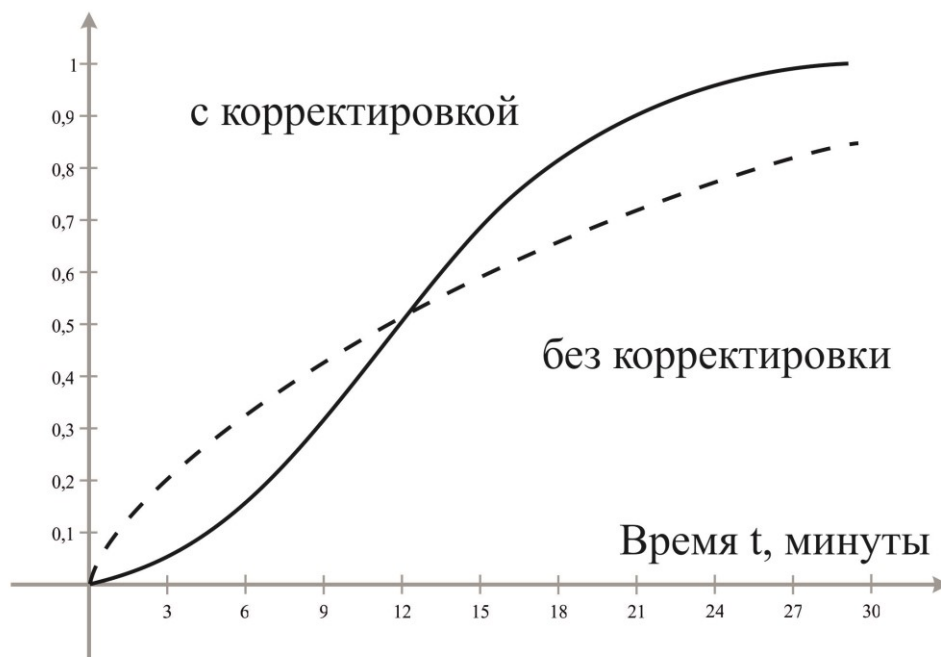


Рисунок 6 – Временные зависимости вероятности поражения цели с корректировкой и без при условии равенства среднего времени ее поражения при значениях параметров $T_0=3$, $T_1=2$, $\lambda=0,1$

Видно, что в начальные периоды времени вероятность поражения цели без корректировки выше, чем вероятность с корректировкой, хотя позже последняя значительно растет. Это связано с условием, которое наложено на модель: среднее время поражения единичной цели T_v не должно меняться. Дело в том, что на начальной стадии необходимо требовать заранее высокой вероятности поражения цели, так как она не будет расти, в отличие от ситуации с корректировкой, поэтому такая картина свойственна для более качественного прицеливания перед первым выстрелом.

Если это условие проигнорировать и требовать, чтобы при первом выстреле вероятность поражения цели была одинаковой как с корректировкой, так и без нее, то формула (5) примет вид: $P_v = \lambda T_0$. В этом случае разница для ситуации с корректировкой и без нее будет значительнее, что показано на рисунке 7.

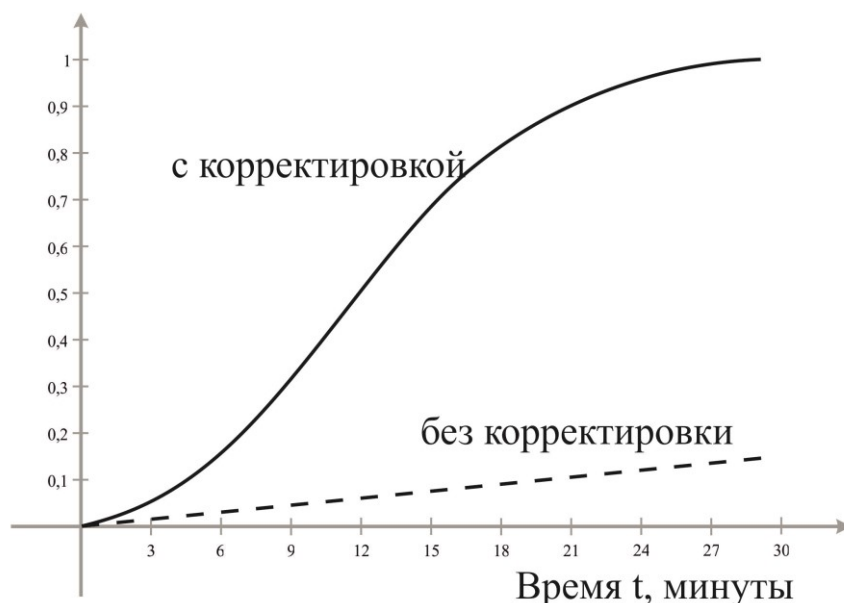


Рисунок 7 – Временные зависимости вероятности поражения цели с корректировкой и без при условии равенства вероятности ее поражения при первом выстреле и значениях параметров $T_0=3$, $T_1=2$, $\lambda=0,1$

Ситуация более значительно меняется при наличии нескольких целей. Временные зависимости поражения нескольких целей, аналогичные тем, которые ранее были приведены на рисунках 4 и 5, но без учета коррекции, изображены на рисунках 8 и 9. При расчете учитывалось условие равенства среднего времени поражения одной цели при учете корректировки и без учета.

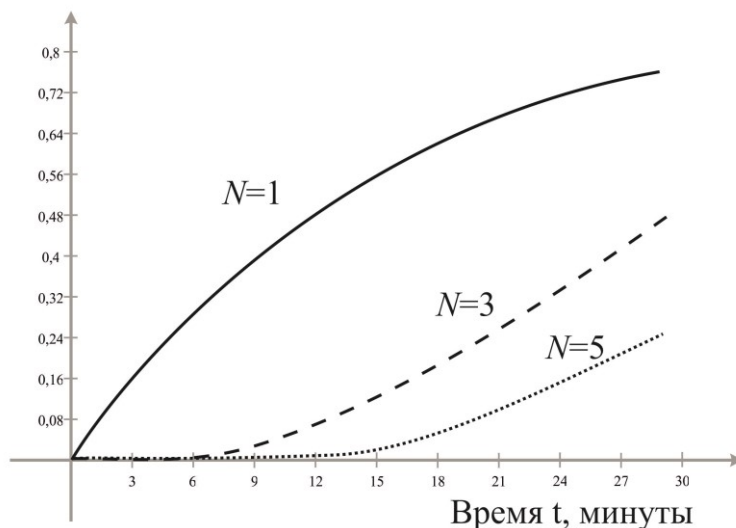


Рисунок 8 – Зависимость вероятности последовательного поражения N целей от времени при отсутствии корректировки и параметрах $T_0=3$, $T_1=2$, $\lambda=0,1$

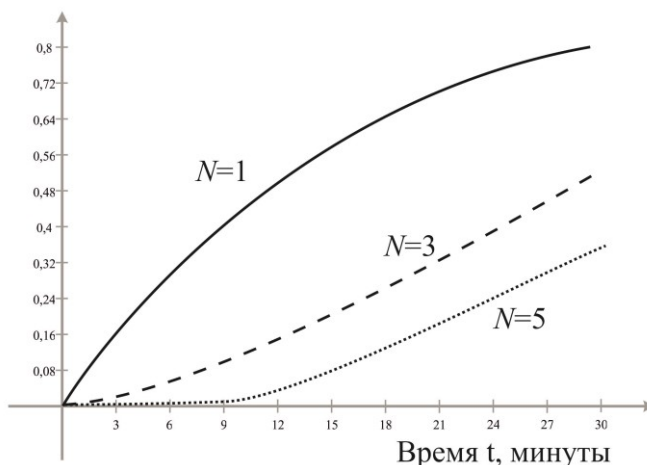


Рисунок 9 – Зависимость вероятности параллельного поражения N целей от времени при отсутствии корректировки и параметрах $T_0=3$, $T_1=2$, $\lambda=0,1$

Более высокая разница в вероятностях при корректировке и без нее связана с тем, что для поражения нескольких целей требуется большее время и эффективность корректировки растет.

Таким образом, в статье фактически предложен новый подход к оценке эффективности применения АСП, учитывающий изменение вероятности поражения в циклах нанесения авиационных ударов. Учет изменения вероятности осуществляется за счет введения временной зависимости вероятности, что позволяет определять необходимые наряды АСП, с учетом изменяющихся от цикла к циклу условий боевого применения. Предложенные модели процесса авиационного поражения целей на основе нестационарных марковских случайных процессов, обладают значимой общностью и могут быть распространены на широкий круг задач.

Список источников

1. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35507>
2. Ивашова Н.Д., Михайлин Д.А., Чернякова М.Е., Шаныгин С.В. Нейросетевое решение задачи оперативного планирования маршрутного полета беспилотных летательных аппаратов и назначение времени наблюдения наземных объектов с помощью нечеткой логики при отображении этих результатов на экране компьютера до вылета // Труды МАИ. 2019. № 104. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=102223>

3. Лебедев Г.Н., Мирзоян Л.А., Ефимов А.В. Выбор многоальтернативных маршрутов полета беспилотного летательного аппарата при наблюдении трассы и наземных точечных объектов на этапе планирования полета // Труды МАИ. 2011. № 48. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=27150>

4. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=61782>

5. Краснов А.М. Управление поражением цели в комплексе авиационного вооружения со случайным изменением структуры // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=27946>

6. Карпенко О.Н., Костин П.С. Способ оценки характеристик пикирования самолета-штурмовика // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102426>

7. Ефанов В.В., Закота А.А., Гунькина А.С. Методика оценки вероятности наведения истребителя в зону разрешенных пусков управляемых ракет в условиях неполного приборного обеспечения // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158262>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-21)

8. Гончаренко В.И., Лебедев Г.Н., Мартынкевич Д.С., Румакина А.В. Оперативное планирование групповых действий летательных аппаратов при обслуживании случайного потока поступающих в полете заявок // XI Международная юбилейная научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования

робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (Москва, 10–11 декабря 2020): сборник докладов. – М.: Изд-во Эдитус, 2021. С. 321-326.

9. Ananev A.V. Goncharenko V.I. Scenario planning of activities of the group of aeronautical robotic engineering complexes in cooperative environments // 2017 Tenth International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD), 2017. DOI:[10.1109/MLSD.2017.8109591](https://doi.org/10.1109/MLSD.2017.8109591)

10. Медынский М.М. Аналитическое моделирование боевых действий и оценка эффективности боевого вертолетного комплекса в объеме боевого вылета // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35501>

11. Ананьев А.В., Козирацкий Ю.Л., Козирацкий А.Ю. и др. Способ высокоточного поражения. Патент RU № 2334937 С1, 20.02.2007.

12. Ананьев А.В., Филатов С.В. Метод выбора рационального способа применения группы ударных беспилотных летательных аппаратов для поражения объектов противника // Военная мысль. 2017. №2. С. 72-78.

13. Козирацкий А.Ю., Капитанов В.В., Судариков Г.И. Оценка возможностей ударной авиационной группы по поражению наземных морских объектов в ходе контртеррористической операции // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 1. С. 9-14.

14. Панов С.А., Халезов М.В., Шмаров А.Н. Модель живучести сложного объекта в условиях нанесения массированного авиационного удара // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 3. С. 423–434.

15. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г., Иванников К.С., Клевцов Р.П. Динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119975>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-18](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-18)
16. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. - М.: Высшая школа, 1998. - 354 с.
17. Матальцкий М.А. Элементы теории случайных процессов: учеб. пособие. - Гродно: ГрГУ, 2004. - 326 с.
18. Алексеев О.Г., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Марковские модели боя. – М.: МО СССР, 1985. – 85 с.
19. Балдин К.В., Башлыков В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Дашков и К, 2016. - 472 с.
20. Энатская Н.Ю., Хакимуллин Е.Р. Теория вероятностей и математическая статистика для инженерно-технических направлений - Люберцы: Юрайт, 2016. - 399 с.

References

1. Kim N.V., Krylov I.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 62. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35507>
2. Ivashova N.D., Mikhailin D.A., Chernyakova M.E., Shanygin S.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102223>

3. Lebedev G.N., Mirzoyan L.A., Efimov A.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 48. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=27150>
4. Lebedev G.N., Rumakina A.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=61782>
5. Krasnov A.M. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=27946>
6. Karpenko O.N., Kostin P.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102426>
7. Efanov V.V., Zakota A.A., Gun'kina A.S. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158262>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-21)
8. Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Martynkevich D.S., Rumakina A.V. *XI Mezhdunarodnaya yubileinaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy sovershenstvovaniya robototekhnicheskikh i intellektual'nykh sistem letatel'nykh apparatov»: sbornik dokladov*, Moscow, Izd-vo Editus, 2021, pp. 321-326.
9. Anan'ev A.V. Goncharenko V.I. Scenario planning of activities of the group of aeronautical robotic engineering complexes in cooperative environments, *2017 Tenth International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD)*, 2017. DOI: [10.1109/MLSD.2017.8109591](https://doi.org/10.1109/MLSD.2017.8109591)
10. Medynskii M.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 61. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35501>
11. Anan'ev A.V., Koziratskii Yu.L., Koziratskii A.Yu. et al. *Patent RU № 2334937 C1*, 20.02.2007.

12. Anan'ev A.V., Filatov S.V. *Voennaya mysl'*, 2017, no. 2, pp. 72-78.
13. Koziratskii A.Yu., Kapitanov V.V., Sudarikov G.I. *Vozdushno-kosmicheskie sily, Teoriya i praktika*, 2017, no. 1, pp. 9-14.
14. Panov S.A., Khalezov M.V., Shmarov A.N. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 423–434.
15. Anan'ev A.V., Rybalko A.G., Ivannikov K.S., Klevtsov R.P. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119975>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-18](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-18)
16. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* (Random process theory and its engineering applications), Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 354 p
17. Matalytskii M.A. *Elementy teorii sluchainykh protsessov* (Elements of Random Process Theory), Grodno, GrGU, 2004, 326 p.
18. Alekseev O.G., Anisimov V.G., Anisimov E.G. *Markovskie modeli boya* (Markov combat models), Moscow, Voenizdat, 1985, 85 p.
19. Baldin K.V., Bashlykov V.N. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (Probability theory and mathematical statistics), Moscow, Dashkov i K, 2016, 472 p.
20. Enatskaya N.Yu., Khakimullin E.R. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika dlya inzhenerno-tekhnicheskikh napravlenii* (Probability theory and mathematical statistics for engineering and technical areas), Lyubertsy, Yurait, 2016, 399 p.

Статья поступила в редакцию 21.03.2022; одобрена после рецензирования 02.04.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted on 21.03.2022; approved after reviewing on 02.04.2022; accepted for publication on 20.04.2022.