УДК 519.876

# Боевая эффективность кибератак: аналитическое моделирование современного боя

Бойко А. А.

***Постановка задачи.*** *В современных боевых действиях и вооруженных конфликтах применяются кибератаки на канальном и вышестоящих уровнях модели OSI. Необходимо обосновывать требования к защищенности образцов вооружения и военной техники от этих атак. Однако известные аналитические модели, применяемые для оценки боевой эффективности электромагнитных воздействий, не позволяют учесть возможности кибератак, связанные с одновременным влиянием на временные и вероятностные характеристики функционирования всех подсистем воинского формирования.* ***Цель работы:*** *разработка аналитической модели современного боя, позволяющей количественно оценить эффективность кибератак на уровне соотношения боевых потенциалов противоборствующих воинских формирований.* ***Идея****: предлагается темпоральный подход к аналитическому моделированию боя, в котором соотношение боевых потенциалов воинских формирований определяется не в виде эмпирической зависимости или отношения функционалов сторон, определяемых их численностями и интенсивностями воздействия на противника, а в виде отношения времени, требуемого для уничтожения выигравшей бой стороны, ко времени, потребовавшемуся для уничтожения проигравшей стороны. Времена до уничтожения сторон вычисляются с учетом их взаимного влияния на боевые циклы противника (с момента начала процесса разведки до завершения процесса огневого поражения цели). Это влияние включает огневое поражение, электромагнитное воздействие и кибератаки. При необходимости бой разбивается на боевые эпизоды, в каждом из которых скорость уничтожения сторонами друг друга неизменна.* ***Новизна*** *состоит в учете при моделировании современного боя эффекта от влияния кибератак на временные и вероятностные характеристики функционирования подсистем разведки, связи, управления и огневого поражения при их совместном применении в рамках боевого цикла воинского формирования.* ***Результат****. На основе предложенного темпорального подхода разработана аналитическая модель современного боя с применением кибератак, влияющих на время передачи сообщений в подсистеме связи, время выполнения операций в подсистеме управления, а также вероятность и время выполнения операций в подсистемах разведки и огневого поражения. Приведено сравнение результатов применения предложенной модели с эмпирической зависимостью Владимирова и аналитическими моделями боя Осипова-Ланчестера 1-го и 2-го рода. Установлено, что предлагаемый темпоральный подход позволяет разрабатывать аналитические модели современного боя, которые можно считать обобщающими известные аналитические модели боя.* ***Практическая значимость****: решение можно использовать при разработке перспективных систем поддержки принятия решения тактического звена.*

***Ключевые слова:*** *аналитическая модель боя, кибератака, боевой потенциал, воинское формирование, боевой цикл*

## Актуальность

В современных боевых действиях и вооруженных конфликтах широко применяются информационно-технические воздействия (ИТВ) [1-8]. Трудно представить современный и тем более перспективный комплекс вооружения

**Библиографическая ссылка на статью:**
Бойко А. А. Боевая эффективность кибератак: аналитическое моделирование современного боя // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 101-133. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10404.

**Reference for citation:**
Boyko A. A. Combat Effectiveness of Cyber-attacks: Analytical Modeling of Modern Warfare. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 101-133. (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10404.

или военной техники (ВВТ), в котором бы не использовались интегрированные друг в друга средства вычислительной техники (СВТ) и радиоэлектронные средства (РЭС) (далее – информационно-технические средства или ИТС, см. [9]), в той или иной степени уязвимые к ИТВ.

В настоящей работе ИТВ – это последовательность действий по формированию совокупности факторов, нацеленной на нарушение конфиденциальности, целостности и/или доступности обрабатываемой ИТС информации и/или алгоритмов, и/или электронных компонентов и/или схем ее обработки и достаточной для реализации с использованием электромагнитных полей и/или электрических токов некоторого условия функционирования ИТС, при выполнении которого это средство переходит в состояние потери работоспособности, сниженной эффективности функционирования, управляемости или доступности для углубленного анализа источником воздействия [10]. К ИТВ с позиции модели OSI относятся электромагнитные воздействия (ЭМВ), которыми традиционно являются радиоэлектронное подавление (РЭП) и поражение электромагнитным излучением (ЭМИ), а также компьютерные или кибератаки (КА), которые еще называют разрушающими программными воздействиями [5], функциональным поражением специальными программными средствами [11], программно-математическими воздействиями [6], радиоэлектронно-информационными воздействиями, программно-аппаратными воздействиями, программно-математическими воздействиями и т.п. ЭМВ применяют на физическом уровне OSI, а КА – на шести вышестоящих уровнях этой модели, используя физический уровень в качестве среды доставки воздействующего фактора. Воздействующий фактор ЭМВ – это электромагнитный или электрический сигнал, несущий исходные данные для алгоритмов функционирования ИТС только в своих амплитудных, частотных, фазовых, временных и пространственных характеристиках. Воздействующий фактор КА – это цифровые данные (с позиции модели OSI – это сообщения и их последовательности), полученные после выделения из электромагнитных или электрических сигналов и используемые ИТС.

По мере внедрения информационных и телекоммуникационных технологий в образцы ВВТ вопросы оценки их защищенности от КА в боевых условиях становятся все более актуальными. Настоящая статья продолжает цикл работ автора [12-21], посвященных этой тематике, и рассматривает методические основы оценки боевой эффективности КА на уровне соотношения боевых потенциалов (БП) противоборствующих воинских формирований (ВФ).

## Постановка задачи

Детальный обзор возможностей КА в современных боевых действиях приведен в работе [8]. Однако для отражения различий ЭМВ и КА этот обзор требует следующего дополнения. Принимая во внимание возможность агентурного внедрения программных закладок по аналогии с известными вирусом «AF/91» в операции «Буря в пустыне» в Ираке и вирусом «STUXNET» на объектах атомной энергетики Ирана, а также возможность влияния КА на находящиеся на поле боя образцы ВВТ из Глобальной информационной сети (*Global Information Grid*), интегрированной в Интернет, тем не менее, из практических

соображений, следует поставить акцент на реализации в боевых условиях КА по беспроводным цифровым каналам связи (в том числе защищенным), строго регламентируемым стандартами телекоммуникационных протоколов. С точки зрения физического уровня модели OSI, на котором традиционно работали специалисты в области радиосвязи специального назначения и радиоэлектронной борьбы (РЭБ), КА представляют собой активную имитирующую радиопомеху. Однако характеристика КА не исчерпывается классической способностью имитирующих помех блокировать работу РЭС сетей радиосвязи или изменять ложными радиосигналами поведение комплексов ВВТ, использующих РЭС радиолокации и/или навигационно-временного обеспечения. Оставляя за кадром криптографические аспекты рассматриваемого вопроса, следует отметить, что применение на канальном уровне модели OSI и выше придает КА дополнительные свойства, позволяющие рассматривать такое воздействие в качестве самостоятельного вида помех:

- **поражающая способность** – КА способны не только подавлять, но и поражать ИТС. То есть после завершения КА для восстановления работоспособности ИТС может потребоваться ремонт. Очевидно, по этой причине в [11] КА относятся к функциональному поражению;
- **транслируемость** – КА воздействуют не только на цифровые РЭС радиосвязи, но и на СВТ, использующие РЭС в качестве модема;
- **авторегенерируемость** – КА способны обеспечивать многократное нарушение штатного режима функционирования целевых ИТС даже после передачи компьютерного вируса (в [14] специального программного средства) в ИТС за счет того, что вирус может оставаться в программной среде целевого ИТС и производить самомодификацию;
- **прозрачность** – КА за счет наличия обратной связи с целью могут контролировать свою эффективность, получая от целей ответные сообщения, которые могут содержать сведения об их местоположении, данные с их машинных носителей информации, а также сведения о сетевой структуре, в рамках которой цели работают;
- **транзитивность** – КА на один элемент сети может привести к выводу из строя других ее элементов, сегментов и всей сети в целом;
- **телеоперационность** – КА на одно ИТС, подключенное к Глобальной информационной сети, состоящей из множества локальных сетей, может нарушить или исказить логику и алгоритмы функционирования любого ИТС в этой Глобальной сети;
- **низкая энергоемкость** – КА не требуют превышения уровня помехового сигнала над полезным, являясь эффективными даже при приеме сигнала с вирусом на пороге чувствительности радиоприемника, что значительно повышает живучесть средств КА в сравнении с классическими средствами ЭМВ на поле боя;
- **высокая избирательность** – КА воздействуют на заданные ИТС без ухудшения качества функционирования других аналогичных ИТС, что исключает проблемы обеспечения электромагнитной совместимости.

Анализ этих свойств показывает, что боевая эффективность КА наиболее полно может быть оценена только наивысшим по иерархии в теории боевой эффективности ВВТ и ВФ боевым показателем соотношения БП ВФ. Использование информационно-боевых и информационных показателей, часто применяемых для оценки эффективности ЭМВ (см., например, [3, 4]), не может быть признано удовлетворительным, поскольку КА способны системно влиять на весь боевой цикл (OODA-цикл, цикл «разведка-поражение», цикл Дж. Бойда и т.д.) или совокупность частных боевых циклов атакуемого ими ВФ, нарушая конфиденциальность, целостность и доступность информации в этих циклах. То есть КА влияют на каждый этап боевого цикла с момента начала процесса получения разведданных о целях до момента применения средств огневого поражения (ОП) по этим целям, а не только на частные процессы разведки, связи и навигационно-временного обеспечения. Вероятно, наиболее яркой метафорой, демонстрирующей суть КА в бою в сравнении с ЭМВ, является оборона античного города, в которой КА – это «троянский конь», проникающий внутрь «крепости» противника (информационной инфраструктуры ВФ) и парализующий ее оборону, в то время как РЭП «ослепляет», отвлекает обороняющихся и «ловит почтовых голубей», а поражение ЭМИ «устраивает землетрясение», подбираясь как можно ближе к крепости и рискуя быть уничтоженным летящими с ее стен камнями и стрелами. Оценка влияния КА на уровне информационно-боевых и тем более информационных показателей эффективности не позволяет системно взглянуть на защищенность образцов ВВТ от КА и учесть эффект, достигаемый КА во всех подсистемах атакуемого ВФ. Это способно привести к недооценке важности обеспечения защиты ВВТ от КА, являющейся не менее значимой, чем защита ВВТ от ЭМВ, которой традиционно уделяется пристальное внимание.

**Анализ известных работ**. Для того чтобы оценить боевую эффективность КА на уровне БП ВФ, рассмотрим сначала сущность самого понятия «боевой потенциал». Под БП ВФ понимается интегральный показатель, характеризующий объем заданий (операций), которые может выполнить ВФ по целевому предназначению в расчетных условиях при нормативных уровнях возможностей систем управления, тылового обеспечения и подготовки личного состава [22]. Военный энциклопедический словарь [23] определяет потенциал (от лат. *potentia* – сила) как средства, запасы, источники, возможности, которые имеются в наличии и могут быть использованы для достижения определенных целей, решения каких-либо задач.

Известные методологические подходы к оценке БП образцов ВВТ и ВФ условно делятся на две группы [24]:

1) **детальной оценки**, когда применяются специализированные имитационно-моделирующие средства, требующие значительного времени и трудозатрат на подготовку исходных данных и моделирование;
2) **экспресс-оценки**, ориентированные на оперативное получение результатов расчетов, но обеспечивающие меньшую детализацию боя.

В [20, 21] рассмотрены особенности подходов первой группы, способствующие их применению при решении частных исследовательских задач с

редким достижением теоретической общности результатов. Подходы второй группы, очевидно, представляют наибольший интерес, поскольку позволяют получить общие решения и используются в качестве базиса в подходах первой группы. Подходы этой группы условно можно разделить на следующие классы.

**1. Подходы на основе качественных оценок.** К таким подходам относятся, например, работы [6, 25-27]. В работе [6] предлагается учитывать возможности КА в «полном» боевом потенциале ВФ наряду с ОП, РЭП, управлением и разведкой в качестве слагаемого. Подходы [25-27] предполагают присвоение КА весового коэффициента, определяемого на основе экспертных оценок. Такие подходы отличаются простотой применения, но не позволяют с точностью, необходимой для обоснования требований к защищенности от КА, проводить сравнительный анализ различных средств реализации КА и защиты от них ВВТ ВФ в условиях боевой обстановки.

**2. Вероятностные подходы.** К таким подходам, в первую очередь, следует отнести подход, предложенный научной школой В.И. Владимирова (см., например, [28, 29]). В нем БП ВФ определяется как произведение БП без РЭП и экспоненты, отрицательная степень которой установлена эмпирически и представляет собой произведение доли подавленных каналов передачи информации ВФ и уровня уязвимости подсистемы управления ВФ. Этот подход полезен в экспресс-оценке РЭП радиосвязи, но не учитывает указанные возможности КА. Сегодня этот подход развивается в работах Р.Л. Михайлова (см., например, [30-32]) в части детализации информационного конфликта информационно-телекоммуникационных систем на основе системного учета взаимного влияния процессов функционирования трех подсистем каждого из противоборствующих ВФ: разведки, связи и РЭП. Однако в этих работах не рассматривается боевой цикл ВФ как единое целое. Это не позволяет учесть в условиях применения сторонами средств ОП возможности КА по влиянию на вероятностные и временные характеристики подсистем разведки и ОП противника, а также на временные характеристики его подсистемы управления.

**3. Подходы на основе теории марковских процессов.** Наиболее известными подходами в этом классе являются подходы на основе метода динамики средних или уравнений Осипова-Ланчестера. Рассмотрим их.

**3.1.** Работы научной школы А.И. Буравлева (например, [24, 33, 34]). В этих работах потенциал ВВТ определяется величиной наносимого противнику среднего ущерба за время его существования при реализации ключевых тактико-технических характеристик, а соотношение БП ВФ определяется классическими уравнениями Осипова-Ланчестера 1-го рода (для высокоорганизованного боя), в которых интенсивности поражающего действия сторон рассчитываются на основе аддитивной свертки БП его образцов ВВТ. При этом полагается, что аддитивная свертка дает нижнюю оценку, а ошибка в результатах применения подхода в сравнении с результатами, которые дают подходы детальной оценки с теми же исходными данными, характеризует коэффициент синергизма, которым обладает ВФ по сравнению с простой совокупностью образцов ВВТ. Этот подход, несомненно, имеет большую ценность для оценки БП отдельных образцов ВВТ, но его применение для оценки БП ВФ ограничивается следующим.

**Во-первых**, для боя многочисленных ВФ в ограниченном дальностью прямой видимости пространстве он может дать эффект, когда сумма пораженных целей противника, складывающаяся из целей, пораженных отдельными средствами ОП, больше их реального числа. Например, когда уничтоженную воздушную цель расчет каждого из стрелявших по ней зенитных орудий записывает на свой счет. **Во-вторых**, он не учитывает возможности сторон по активному противодействию боевым циклам как отдельных образцов ВВТ, так и ВФ противника в целом (в том числе средствами РЭБ и в частности КА), что особенно актуально для современного боя. Поэтому с применением этого подхода весьма вероятна не нижняя оценка, предполагающая синергизм, а завышенная оценка и «антисинергизм», когда «2+2<4», что даст мнимую уверенность в своих силах.

**3.2.** Работы отечественных (например, [6, 35-40]) и зарубежных (например, [41-43]) авторов, в которых детально исследуются различные вариации уравнений Осипова-Ланчестера. В частности, в работах [37] и [43] приведены весьма ценные результаты теоретического обобщения моделей динамики средних для различных вариантов боя, а работа [43], кроме того, содержит детальный обзор зарубежных исследований в рассматриваемой предметной области. В работах научной школы А.И. Черноскутова [38, 39] с использованием уравнений динамики средних анализируется бой, в котором участвуют более двух сторон, а точнее одна из сторон рассматривается как совокупность нескольких относительно самостоятельных сторон. В работе [12] предлагается базирующаяся на уравнениях Осипова-Ланчестера 1-го рода модель боя с применением всей номенклатуры ИТВ. Однако, не смотря на возможность оценки влияния КА на все подсистемы ВФ, в этой работе рассматриваются только вероятностные параметры этапов боевых циклов противоборствующих сторон, а временным параметрам этих циклов внимание не уделяется.

В рамках данного класса подходов представляет интерес работа [44], где решается задача аналитического моделирования боя с применением ЭМВ на основе т.н. «уравнений Динера» [45]. Следует отметить, что изложенные в [44] уравнения являются упрощенными уравнениями Осипова-Ланчестера 2-го рода (см., например, [43]). В этом подходе используется одновременное приращение интенсивности выполнения задач поражения одной стороны за счет наступательных действий по РЭБ и снижение интенсивности выполнения задач поражения второй стороны за счет защитных действий по РЭБ. Иными словами, в модели [44] считается, что вдобавок к тому, что сторона подверглась ЭМВ, и скорость противника по ее уничтожению возросла, она еще и снижает свою скорость уничтожения противника, защищаясь от ЭМВ. Очевидно, такая ситуация крайне редко бывает в реальном бою, где действия противника каждая сторона стремится своим противодействием ослабить, а не усилить.

В целом указанные работы отличаются глубокой теоретической проработкой, но в полном объеме актуальные для КА вопросы организации боевых циклов ВФ в них также не учитываются.

**3.3.** Работы научной школы Ю.Л. Козирацкого (например, [46-50]), которые ввиду их первоначальной ориентации на ЭМВ заслуживают отдельного рассмотрения. Методологическая основа этих работ состоит в применении ма-

тематического аппарата полумарковских процессов для анализа переходных процессов в боевых ситуациях с применением средств ЭМВ. Эта основа базируется на методах теории автоматического управления, в которой процессы моделируются в форме передаточных функций, и, пожалуй, наилучшим образом адаптирована для исследования сложных дуэльных ситуаций, возникающих в бою. Но недостаток этого подхода для моделирования боя ВФ лучше всего отмечают сами авторы [50]: «возрастание численности каждой из сторон приводит к значительному увеличению мощности множества состояний динамической модели, что несмотря на экспоненциальные законы распределения времени ожидания при переходах приведет к существенной громоздкости полученных аналитических соотношений и возникновению определенных сложностей при обратном преобразовании Лапласа». Поэтому в работе [50] уже при численности ВФ, равной 5, используется имитационное моделирование, относящееся к рассмотренной выше первой группе подходов к оценке БП.

В данном контексте следует обратить особое внимание на экспоненциальный закон плотности распределения времени переходов между состояниями модели исследуемого процесса в моделях рассматриваемого класса. Этот закон активно применялся в марковских моделях в период их становления в начале XX века. Тогда датчанин А.К. Эрланг предположил, что время вызовов в городской телефонной сети характеризуется экспоненциальным законом. Однако, несмотря на то, что этот закон имеет существенное значение в теории марковских процессов, следует учитывать два ключевых момента. Во-первых, суть этого закона: чем меньше время, тем больше вероятность реализации перехода. Во-вторых, коэффициент вариации (отношение среднеквадратического отклонения (СКО) к математическому ожиданию) у этого закона равен 1 [51]. В то же время, например, в практике испытаний образцов ВВТ за счет увеличения количества экспериментов СКО доводится до нескольких процентов математического ожидания. По этой причине при экспоненциальном законе не следует ожидать привычной для практики точности результатов моделирования.

Кроме того, относясь с большим уважением к пионерским работам М.П. Осипова и Ф.У. Ланчестера и работам их последователей и понимая неоценимость сделанного ими вклада в дело моделирования боевых действий, следует обратить внимание на вид зависимости численности сторон от времени, получаемый с применением предложенных в этих работах уравнений динамики боя. Она имеет экспоненциальный характер. Возникает вопрос: при каких условиях на практике при неизменных во времени скоростях уничтожения сторонами друг друга их численности могут убывать по экспоненте? Ответ: ни при каких. На практике в таком случае может иметь место только очевидная линейная зависимость. Ведь если человек идет из пункта А в пункт Б с неизменной скоростью, то почему в начале пути он будет проходить за единицу времени гораздо больше пути, чем в конце. Это противоречит классическим постулатам кинематики. Зависимости в уравнениях Осипова-Ланчестера имеют экспоненциальный характер только потому, что используемый в их основе метод динамики средних предполагает все тот же экспоненциальный закон распределения времени переходов между двумя метасостояниями противоборствующих сто-

рон. Поэтому следует осторожно относиться к использованию экспоненциального закона в уравнениях динамики боя при анализе переходных процессов.

Проведенный обзор подходов к экспресс-оценке БП ВФ не претендует на исчерпывающую полноту. Тем не менее, он показывает, что подходы, которые позволили бы полноценно учесть особенности КА в бою, связанные с их одновременным влиянием на временные и вероятностные характеристики функционирования всех подсистем противника, на сегодняшний день отсутствуют.

**Цель работы** – разработка аналитической модели боя, позволяющей количественно оценить боевую эффективность КА на уровне соотношения БП противоборствующих ВФ в заданных боевых условиях.

## Решение задачи

**Подход к оценке БП.** Рассмотрим динамику численности сторон в бою при средних скоростях потерь. При этом заметим, что в реальном бою скорости потерь сторон изменяются. Для того чтобы оперировать средними скоростями можно воспользоваться методом боевых эпизодов, содержание которого рассмотрено в предшествующем цикле работ автора [13-21]. Этот метод позволяет получить описание ВФ с детализацией до полумарковских моделей процессов функционирования отдельных неинформатизированных технических средств и ИТС элементов боевых порядков, включая различные аспекты конфликтного взаимодействия подсистем защиты информации и компьютерных вирусов. Согласно методу боевых эпизодов сценарий боя разбивается на эпизоды, в каждом из которых скорость убывания сил каждой стороны считается неизменной.

Для наглядности рассмотрим простейший вариант боя, состоящий из одного эпизода. На рис. 1 показаны варианты геометрической интерпретации динамики численности ВФ в таком бою при победе Синих, когда их численность больше или меньше численности Красных. Красные прекратили сопротивление в момент времени $T_{кр}$, дойдя до критического значения $N_{крит_кр}$. Синие были бы уничтожены в момент времени $T_{син}$, если бы Красные продолжили сопротивление. В момент $T_{кр}$ численность Синих снизилась на $\Delta N_{син}$.

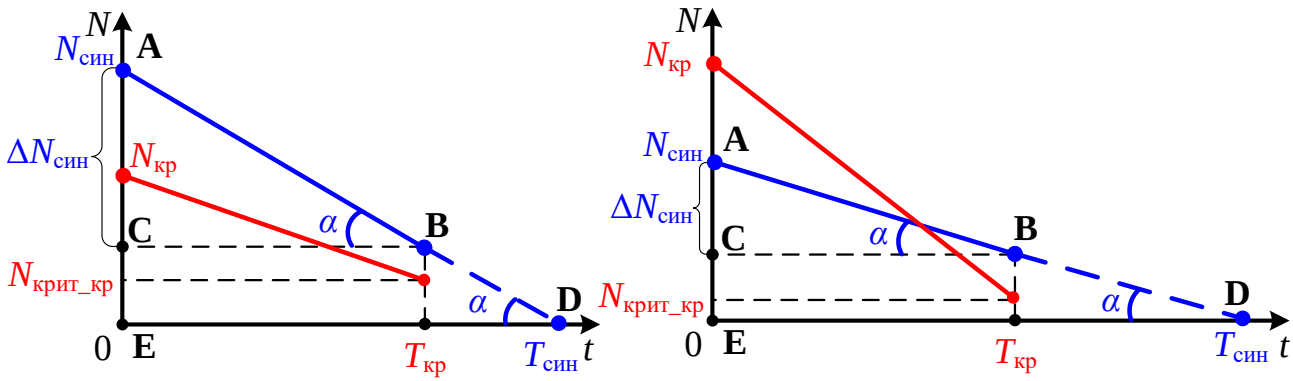


Рис. 1. Геометрические интерпретации динамики численности ВФ в бою

На рис. 1 прямоугольные треугольники △**ABC** и △**ADE** подобны. Это следует из равенства их углов. Из этого следует соотношение:

$$\frac{\Delta N_{\text{син}}}{N_{\text{син}}} = \frac{T_{\text{кр}}}{T_{\text{син}}}. \quad (1)$$

То есть боевые потери победивших Синих равны:

$$\Delta N_{\text{син}} = \frac{T_{\text{кр}} N_{\text{син}}}{T_{\text{син}}}. \quad (2)$$

Согласно теории боевой эффективности ВВТ и ВФ потенциал определяется величиной наносимого противнику среднего ущерба за время его существования. В рассматриваемом примере Синие потеряли $\Delta N_{\text{син}}/N_{\text{син}}$ своих сил, а Красные потеряли все свои силы. Будем считать, что у победившей стороны БП равен 1 (или 100%), поскольку она уничтожила противника, а у проигравшей он меньше 1. Тогда соотношение БП сторон рассчитывается по формуле:

$$f = \left(\frac{\Delta N_{\text{син}}}{N_{\text{син}}}\right)^{-1} = \frac{N_{\text{син}}}{\Delta N_{\text{син}}}. \quad (3)$$

Формула (3) приводится к виду:

$$f = \frac{N_{\text{син}}}{N_{\text{син}} - \Delta N^{+}_{\text{син}}} = \frac{1}{1 - \Delta N^{+}_{\text{син}}/N_{\text{син}}} = \frac{1}{1 - \Delta N^{*}_{\text{син}}}, \quad (4)$$

где $\Delta N^{+}_{\text{син}}$ и $\Delta N^{*}_{\text{син}}$ – соответственно, остаточная численность и остаточная доля численности победившей стороны, т.е. Синих.

Показатель $\Delta N^{*}_{\text{син}}$ в качестве альтернативного показателя, характеризующего соотношение БП, будет использоваться в дальнейшем.

Подставляя (2) в (3), получаем формулу для оценки соотношения БП, выраженную через время до уничтожения сторон:

$$f = T_{\text{син}}/T_{\text{кр}}. \quad (5)$$

Формула (5) представляет собой концептуальную основу предлагаемого темпорального (то есть временн*о*го, от лат. *tempus* – время) подхода к аналитическому моделированию боя. В (1) – (5) при победе Красных меняются индексы.

**Модель современного боя.** Для того, чтобы определить значения времен $T_{\text{кр}}$ и $T_{\text{син}}$, рассмотрим упрощенную модель боя с применением ИТВ. Детализированную модель такого боя можно создать с применением вышеуказанного метода боевых эпизодов. Структурная схема боя показана на рис. 2.

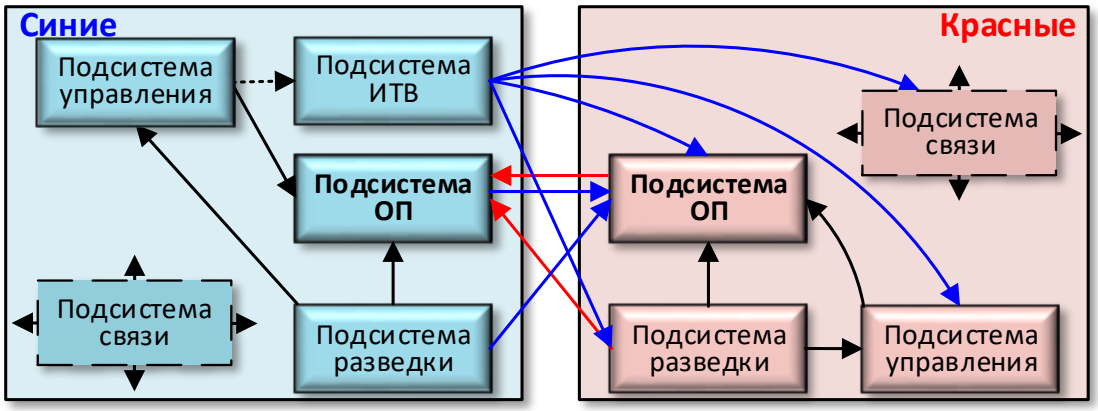


Рис. 2. Структурная схема антагонистического конфликта с применением ИТВ

Состав Красных и Синих включает подсистемы разведки, связи, управления и ОП. Наступающим Синим дополнительно придана подсистема ИТВ, включающая средство ИТВ. Показатели подсистем приведены в таблице 1. В рассматриваемом бою подсистемы разведки, управления, связи и ИТВ (в части КА) являются скрытными, и средства ОП сторон поражают только друг друга. То есть, «в рассматриваемую группу средств ближнего боя взята численность средств ОП с условно включенными в нее другими важными объектами, влияние которых на исход противоборства проявляется через эффективность средств ОП» [44]. Восстановление средств ОП не происходит, и дополнительные резервы не придаются (их учитывает метод боевых эпизодов).

Таблица 1 – Обозначения и физический смысл показателей в модели боя

| № | Обозначение | Физический смысл | Единица измерения |
|---|---|---|---|
| | | **Общие показатели** | |
| 1 | $U$ | ослабление ущерба обороняемым позициям (для наступающей стороны равен 1) | раз |
| 2 | $P_{гар}$ | требуемая вероятность гарантированного ОП цели | – |
| 3 | $\Delta$ | уровень информатизации Красных | – |
| | | **Подсистема ОП** | |
| 4 | $N_{кр}$, $N_{син}$ | количество средств ОП Красных и Синих | ед. |
| 5 | $P_{1бп_кр}$, $P_{1бп_син}$ | вероятность поражения цели одним боеприпасом средства ОП Красных и Синих | – |
| 6 | $T_{оп_кр}$, $T_{оп_син}$ | время подготовки подсистемы ОП Красных и Синих, включающее время обработки управляющей информации (в каналах нет очереди) | с |
| 7 | $T_{1бп_кр}$, $T_{1бп_син}$ | время воздействия одним боеприпасом в подсистеме ОП Красных и Синих | – |
| 8 | $K_{бп_кр}$, $K_{бп_син}$ | количество боеприпасов в боекомплекте одного средства ОП Красных и Синих | ед. |
| 9 | $N_{им_кр}$, $N_{им_син}$ | количество имитируемых средств ОП Красных и Синих | ед. |
| | | **Подсистема разведки** | |
| 10 | $T_{р_кр}$, $T_{р_син}$ | время работы подсистемы разведки, включающее время обнаружения цели, анализа разведданных и подготовки развединформации (в каналах нет очереди) Красных и Синих | с |
| 11 | $P_{р_кр}$, $P_{р_син}$ | вероятность вскрытия и распознавания цели подсистемой разведки Красных и Синих | – |
| | | **Подсистема управления** | |
| 12 | $T_{упр_кр}$, $T_{упр_син}$ | время работы подсистемы управления Красных и Синих, включающее время оценки обстановки, принятия решения и подготовки управляющей информации (в каналах нет очереди) | с |
| | | **Подсистема связи** | |
| 13 | $T_{св_кр}$, $T_{св_син}$ | время передачи информации по каналу связи Красных и Синих | с |
| 14 | $P_{св_кр}$, $P_{св_син}$ | вероятность гарантированной передачи информации по каналу связи Красных и Синих | – |
| | | **Подсистема ИТВ** | |
| 15 | $P_{ИТВ}$ | вероятность ИТВ Синих | – |

Подсистема управления может работать в режиме сетецентрического управления, когда средства подсистемы ОП получают целеуказания из подсистемы разведки, минуя подсистему управления. После уничтожения средства ОП огонь автоматически переводится на еще не уничтоженные средства ОП противника. При применении Синими РЭП Красные обнаруживают местоположение источника помех своей подсистемой разведки. То есть заметность техники РЭП в модели учитывается на качественном уровне (детальный учет заметности образцов ВВТ в модели боя см. в [17]). Средства ОП применяются в одном из двух режимов: «ОП$\succ$РЭП» или «РЭП$\succ$ОП» (здесь и далее $\succ$ – знак предпочтения; «А$\succ$Б» означает, что подсистема А приоритетнее, чем Б).

Рассмотрим аналитические выражения для вычисления значений времен уничтожения сторон в режиме «ОП$\succ$РЭП».

Время уничтожения Красных в режиме «ОП$\succ$РЭП» вычисляется как:

$$T_{\text{кр(ОП)}} = \begin{cases} T_{\text{1бп_кр}} + \Omega, \text{ если наступают Красные;} \\ \Omega, \text{ если наступают Синие,} \end{cases}$$

при

$$\Omega = \frac{N_{\text{кр}} + N_{\text{им_кр}}}{N_{\text{син}}} \cdot K_{\text{1кр}} \cdot T_{\text{бц_син}}, \tag{6}$$

где: $K_{\text{1кр}}$ – количество боеприпасов, необходимое средству ОП Синих для уничтожения 1 средства ОП Красных; $T_{\text{бц_син}}$ – время боевого цикла Синих.

Значение показателя $K_{\text{1кр}}$ для случая, когда боеприпасы не расходуются на цель без гарантии ее поражения, вычисляется по классической формуле [52]:

$$K_{\text{1кр}} = \begin{cases} \Theta, \text{ если } \Theta \geq K_{\text{бп_кр}}; \\ \infty \text{ в противном случае} \end{cases}$$

при

$$\Theta = \left\lceil \frac{\ln\left(1 - P_{\text{гар}}\right)}{\ln\left(1 - P_{\text{1бп_син}} \cdot P_{\text{р_син}} \cdot U\right)} \right\rceil, \tag{7}$$

где $\lceil \ \rceil$ – операция округления до ближайшего целого в большую сторону;

Значение показателя $T_{\text{бц_син}}$ в формуле (6) предлагается вычислять как:

$$T_{\text{бц_син}} = \begin{cases} T_{\text{1бп_син}}, \text{ если } (\text{позиции статичны}) \vee (\text{наступают Синие}); \\ T_{\text{р_син}} + T_{\text{св_син}} + T_{\text{оп_син}} + T_{\text{1бп_син}}, \text{ если} \\ \qquad (\text{наступают Красные}) \wedge (\text{позиции динамичны}) \wedge \\ \qquad \wedge (\text{есть сетецентрическое управление у Синих}); \\ T_{\text{р_син}} + T_{\text{упр_син}} + 2T_{\text{св_син}} + T_{\text{оп_син}} + T_{\text{1бп_син}}, \text{ если} \\ \qquad (\text{наступают Красные}) \wedge (\text{позиции динамичны}) \wedge \\ \qquad \wedge (\text{нет сетецентрического управления у Синих}). \end{cases} \tag{8}$$

Время уничтожения Синих в режиме «ОП$\succ$РЭП» вычисляется по формуле (6), в которой инвертированы индексы сторон конфликта, то есть:

$$T_{\text{син(ОП)}} = \begin{cases} T_{\text{1бп_син}} + \Omega, \text{ если наступают Синие;} \\ \Omega, \text{ если наступают Красные,} \end{cases}$$

при

$$\Omega = \frac{N_{\text{син}} + N_{\text{им_син}}}{N_{\text{кр}}} \cdot K_{\text{1син}} \cdot T_{\text{бц_кр}}, \tag{9}$$

где: $K_{\text{1син}}$ – количество боеприпасов, необходимое средству ОП Красных для уничтожения 1 средства ОП Синих; $T_{\text{бц_кр}}$ – время боевого цикла Красных.

Формулы (6) и (9) предполагают одинаковую тактику применения средств ОП сторон. Например, в работах [33, 40] показано, что наиболее выгодной является тактика «все на одного» с последовательным переводом огня на менее приоритетные цели.

Значение показателя $K_{\text{1син}}$ в формуле (9) для случая, когда боеприпасы не расходуются на цель без гарантии ее поражения, вычисляется по формуле:

$$K_{\text{1син}} = \begin{cases} \Theta, \text{ если } \Theta \geq K_{\text{бп_син}}; \\ \infty \text{ в противном случае} \end{cases}$$

при

$$\Theta = \left\lceil \frac{\ln\left(1 - P_{\text{гар}}\right)}{\ln\left(1 - \left(P_{\text{1бп_кр}} \cdot L_{\text{ИТВ_оп}}\right) \cdot \left(P_{\text{р_кр}} \cdot L_{\text{ИТВ_р}}\right) \cdot U\right)} \right\rceil, \tag{10}$$

где: $L_{\text{ИТВ_оп}}$ и $L_{\text{ИТВ_р}}$ – показатели снижения вероятности выполнения процессов в подсистемах ОП и разведки Красных за счет КА или любого ЭМВ. Значения этих показателей предлагается рассчитывать с использованием выражения:

$$L_{\text{ИТВ_*}} = \begin{cases} 1 - P_{\text{ИТВ}} \cdot \Delta, \text{ если на подсистему *} \\ \qquad\qquad \text{производится КА или любое ЭМВ;} \\ 1 \text{ в противном случае.} \end{cases} \tag{11}$$

Значение показателя $T_{\text{бц_кр}}$ в формуле (9) предлагается вычислять как:

$$T_{\text{бц_кр}} = \begin{cases} T_{\text{1бп_кр}}, \text{если (позиции статичны)} \vee \text{(наступают Красные);} \\ T_{\text{р_кр}} \cdot K_{\text{ИТВ_р}} + T_{\text{св_кр}} \cdot K_{\text{ИТВ_св}} + \left(T_{\text{оп_кр}} + T_{\text{1бп_кр}}\right) \cdot K_{\text{ИТВ_оп}}, \text{ если} \\ \qquad \text{(наступают Синие)} \wedge \text{(позиции динамичны)} \wedge \\ \qquad \wedge \text{( у Красных есть сетецентрическое управление);} \\ T_{\text{р_кр}} \cdot K_{\text{ИТВ_р}} + T_{\text{упр_кр}} \cdot K_{\text{ИТВ_упр}} + 2T_{\text{св_кр}} \cdot K_{\text{ИТВ_св}} + \\ + \left(T_{\text{оп_кр}} + T_{\text{1бп_кр}}\right) \cdot K_{\text{ИТВ_оп}}, \text{ если} \\ \qquad \text{(наступают Синие)} \wedge \text{(позиции динамичны)} \wedge \\ \qquad \wedge \text{(у Красных нет сетецентрического управления ).} \end{cases} \tag{12}$$

Показатели $K_{\text{ИТВ_р}}$, $K_{\text{ИТВ_оп}}$ и $K_{\text{ИТВ_упр}}$ в формуле (12) характеризуют влияние КА Синих на время выполнения операций, соответственно, в подсистеме разведки, ОП и управления Красных. Учитывая вероятностный характер КА

или поражения ЭМИ и обязательность выполнения операций в подсистемах, эти показатели характеризуют количество попыток выполнить одну и ту же операцию в условиях КА или поражения ЭМИ. Для оценки значений этих показателей предлагается применять известную в теории вероятностей формулу определения гарантированного количества независимых повторений одного эксперимента в пессимистическом случае, когда успешное выполнение операции осуществляется при ее последнем повторении:

$$K_{\text{ИТВ_р}}=K_{\text{ИТВ_оп}}=K_{\text{ИТВ_упр}}=\begin{cases}\left(1-P_{\text{ИТВ}}\cdot\Delta\right)^{-1}, \text{ если подсистема} \\ \text{подвержена КА или поражению ЭМИ;} \\ 1 \text{ в противном случае;}\end{cases} \quad (13)$$

Количество попыток для различных Δ и $P_{\text{ИТВ}}$ показано на рис. 3.

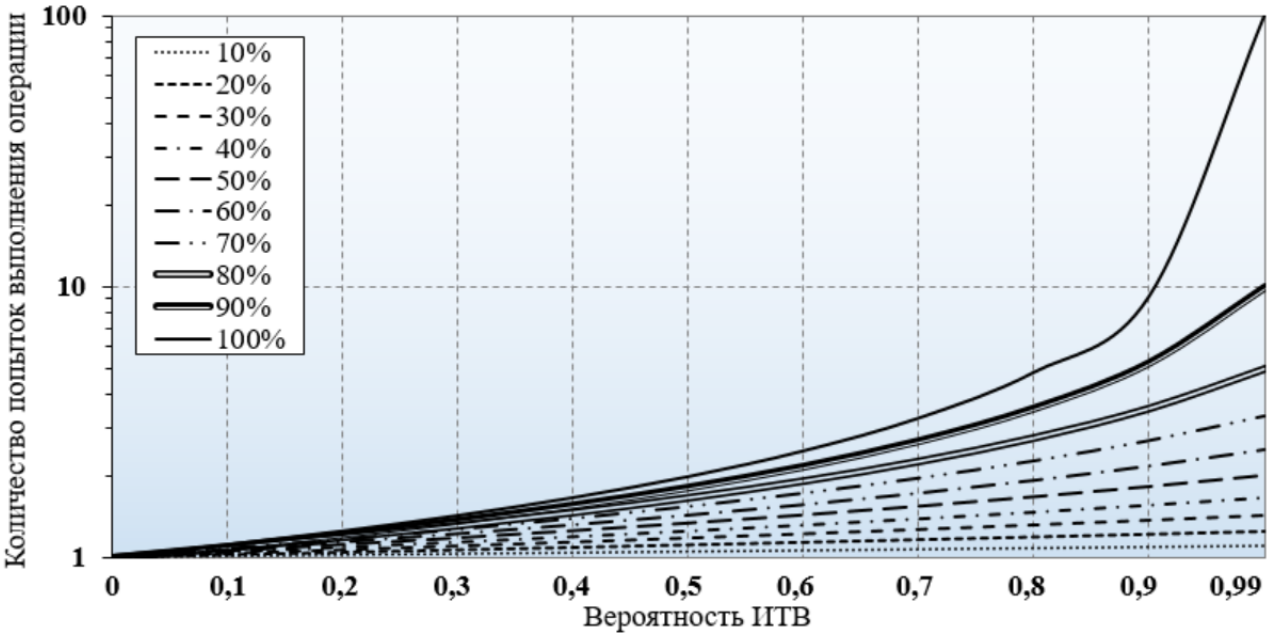


Рис. 3. Зависимость количества попыток выполнения одной операции от вероятности ИТВ при различных Δ (в логарифмическом масштабе)

Оценить значение показателя $K_{\text{ИТВ_св}}$ предлагается по формуле [28]:

$$K_{\text{ИТВ_св}}=\begin{cases}\dfrac{\ln P_{\text{св_кр}}}{\ln\left(1-P_{\text{ИТВ}}\cdot\Delta\right)}, \text{ если} \\ \text{на подсистему связи производится ЭМВ или КА;} \\ 1 \text{ в противном случае.}\end{cases} \quad (14)$$

Формула (14) используется для учета КА или любого ЭМВ. Из этой формулы следует критерий эффективности ИТВ на подсистему связи:

$$P_{\text{ИТВ}} > (1-P_{\text{св_кр}})\Delta^{-1}. \quad (15)$$

Методика расчета значения показателя Δ для отдельного образца ВВТ и ВФ в целом предложена в [18]. Под уровнем информатизации подсистемы связи ВФ к формуле (14) понимается доля в ВФ образцов ВВТ, связь которых с остальными элементами ВФ осуществляется с применением ИТС связи (за исключением средств проводной аналоговой связи).

В режиме работы средств ОП с приоритетом «РЭП ≻ ОП» подсистема ОП Красных до обнаружения средства РЭП Синих воздействует на их подсистему ОП, после обнаружения средства РЭП уничтожает его и продолжает воздействовать на подсистему ОП Синих.

Время уничтожения Красных в режиме «РЭП ≻ ОП» вычисляется по формуле (6), т.е. $T_{кр(РЭП)} = T_{кр(ОП)}$. Время до уничтожения подсистемы ИТВ Синих при условии одновременного начала РЭП и ОП, что обусловлено практикой, вычисляется следующим образом:

$$T_{ун_ИТВ} = \begin{cases} T_{вскр_ИТВ} + \dfrac{K_{1син} \cdot T_{1бп_кр}}{N_{кр} \cdot P_{оп_кр}\left(T_{вскр_ИТВ}\right)}, \text{ если позиции динамичны;} \\ \left(K_{1син} \cdot T_{1бп_кр}\right) / N_{кр} \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (16)$$

где: $T_{вскр_ИТВ}$ – время вскрытия Красными местонахождения подсистемы ИТВ Синих; $P_{оп_кр}(T_{вскр_ИТВ})$ – вероятность работоспособного состояния подсистемы ОП Красных в момент $T_{вскр_ИТВ}$.

Значение показателя $T_{вскр_ИТВ}$ в формуле (16) предлагается вычислять следующим образом:

$$T_{вскр_ИТВ} = \begin{cases} T_{р_кр} \cdot K_{ИТВ_р} + T_{св_кр} \cdot K_{ИТВ_св} + \left(T_{оп_кр} + T_{1бп_кр}\right) \cdot K_{ИТВ_оп}, \\ \quad \text{если у Красных сетецентрическое управление;} \\ T_{р_кр} \cdot K_{ИТВ_р} + T_{упр_кр} \cdot K_{ИТВ_упр} + 2T_{св_кр} \cdot K_{ИТВ_св} + \\ + \left(T_{оп_кр} + T_{1бп_кр}\right) \cdot K_{ИТВ_оп}, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (17)$$

Для вычисления значения показателя $P_{оп_кр}(T_{вскр_ИТВ})$ в формуле (16) предлагается воспользоваться классической для теории надежности моделью функционирования сложной технической системы, дополненной состоянием «уничтожено», характерным для условий боевой эксплуатации. Такая модель предложена в [13]. Граф состояний этой модели представлен на рис. 4.

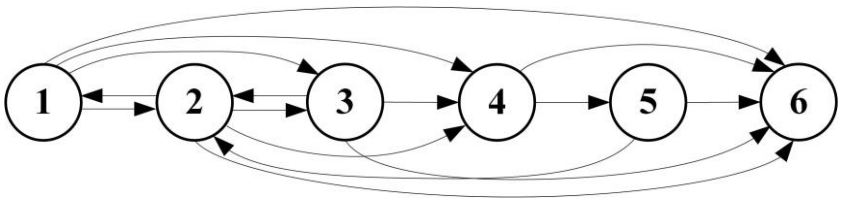


Рис. 4. Граф состояний, отражающий динамику функционирования сложной технической системы в бою с позиции теории надежности [13]

Граф включает следующие состояния: 1 – работоспособность; 2 – зависание; 3 – сбой; 4 – отказ; 5 – ремонт; 6 – уничтожено. В модели на рис. 4 отсутствует последействие, но в наиболее общем случае плотность распределения времен переходов в сложных технических системах характеризуется не экспоненциальным законом, а близка к нормальному закону. Для приведения моделей такого рода к Марковским предлагается использовать модификацию метода псевдосостояний, изложенную в работе М.Г. Чикина [53]. Плотность распреде-

ления времени нахождения полумарковского процесса в каждом состоянии описывается с использованием обобщенного закона Эрланга $n$-го порядка:

$$T_{s,v}(t) = (-1)^{n-1} \prod_{i=0}^{n-1} \lambda_{s,v,i} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{e^{-\lambda_{s,v,j} t}}{\prod_{k=0, k \neq j}^{n-1} \left( \lambda_{s,v,j} - \lambda_{s,v,k} \right)}, \quad (18)$$

где: $T_{s,v}(t)$ – плотность распределения времени нахождения системы в $s$-м состоянии до перехода в $v$-е состояние; $\lambda_{s,v,i\{j,k\}}$ – параметр обобщенного закона Эрланга $n$-го порядка.

Коэффициент вариации в этом законе определяется величиной $n^{-0,5}$ [51]. Например, СКО, равное 10% от математического ожидания, достигается при $n$ = 100. В работе [14] предложен алгоритм автоматизации метода, изложенного в [53]. Для повышения скорости расчетов динамики $P_{\text{оп_кр}}$ может использоваться упрощенная модель функционирования сложной технической системы, граф которой включает состояния 1 и 6. Это позволяет свести получаемую с использованием метода, изложенного в [53], полумарковскую модель к последовательности из $n$+1 состояний с однонаправленными переходами из 1-го в $n$+1-е состояние и интенсивностью переходов между состояниями λ, равной частному от деления времени до уничтожения на $n$. Полученная система из $n$ линейных дифференциальных уравнений решается известным численным методом.

Рассмотрим далее аналитические зависимости для оценки времени до уничтожения подсистемы ОП Синих в режиме «РЭП ≻ ОП». Это время вычисляется по формуле:

$$T_{\text{син(РЭП)}} = T_{\text{ун_ИТВ}} + T_{\text{ост}}, \quad (19)$$

где: $T_{\text{ун_ИТВ}}$ – см. формулу (16); $T_{\text{ост}}$ – время уничтожения Красными оставшейся доли подсистемы ОП Синих после уничтожения подсистемы ИТВ (то есть без влияния РЭП Синих).

Положим, что сумма долей средств ОП Синих, уничтоженных Красными до ($Z_{\text{до}}$) и после ($Z_{\text{после}}$) уничтожения подсистемы ИТВ Синих, равна единице, то есть $Z_{\text{до}}+Z_{\text{после}}=1$. При неизменной интенсивности ОП в бою в течение времени $T_{\text{ун_ИТВ}}$ Красными будет уничтожена доля подсистемы ОП Синих $Z_{\text{до}}$, вычисляемая с использованием следующей формулы:

$$Z_{\text{до}} = \frac{T_{\text{ун_ИТВ}}}{T^{\bullet}_{\text{син(ОП)}}}, \quad (20)$$

где $T^{\bullet}_{\text{син(ОП)}}$ – время уничтожения Синих в режиме «ОП ≻ РЭП», вычисляемое по формуле:

$$T^{\bullet}_{\text{син(ОП)}} = \begin{cases} T_{\text{1бп_син}} + \Omega, & \text{если наступают Синие;} \\ \Omega, & \text{если наступают Красные,} \end{cases}$$

при

$$\Omega = \frac{N_{\text{син}} + N_{\text{им_син}} + 1}{N_{\text{кр}}} \cdot K_{\text{1син}} \cdot T_{\text{бц_кр}}. \quad (21)$$

Оставшаяся доля подсистемы ОП Синих $Z_{после}$, которая будет уничтожаться по истечении времени $T_{ун_ИТВ}$, определяется по формуле:

$$Z_{после} = 1 - Z_{до} = 1 - \frac{T_{ун_ИТВ}}{T^{\bullet}_{син(ОП)}}. \quad (22)$$

Тогда время $T_{ост}$ в формуле (19) будет вычисляться следующим образом:

$$T_{ост} = \left(1 - Z_{до}\right) \cdot T_{син(ОП)} = \left(1 - \frac{T_{ун_ИТВ}}{T^{\bullet}_{син(ОП)}}\right) \cdot T_{син(ОП)}. \quad (23)$$

Подставляя (23) в (19), получаем следующее выражение:

$$T_{син(РЭП)} = T_{ун_ИТВ} + \left(1 - \frac{T_{ун_ИТВ}}{T^{\bullet}_{син(ОП)}}\right) \cdot T_{син(ОП)}. \quad (24)$$

Исходные параметры рассматриваемой модели могут детализироваться. Например, могут вводиться несколько типов средств, входящих в состав каждой подсистемы, учитываться особенности работы средств каждого типа применительно к различным типам целей. Общности модели это не нарушит, поскольку в предлагаемом темпоральном подходе к аналитическому моделированию боя важна не численность сторон, а время, которое необходимо сторонам для уничтожения противника. При перемещении элементов боевых порядков в трехмерном пространстве в рамках заданного сценария боя время до уничтожения этих элементов вычисляется в отдельных боевых эпизодах для остаточной после предыдущего эпизода численности воинского формирования с учетом дальностных характеристик средств, входящих в его подсистемы.

## Верификация модели

Задача верификации модели боя является крайне сложной и может быть решена только частично, так как подтвердить натурным экспериментом результаты математического моделирования в этом случае нельзя. Представляется возможным только применять математические модели к уже имеющимся статистическим данным. Но статистика уязвимостей ВВТ ВФ к ИТВ в средствах массовой информации не публикуется, поскольку такая информация имеет важное значение для обороноспособности любой страны. К тому же известные аналитические модели боя строятся на существенно отличающихся принципах, используют сокращенный набор параметров ИТВ и ВФ, на которые влияет ИТВ, а приводимые авторами этих моделей результаты в большинстве случаев не содержат полного описания исходных данных. Тем не менее, частичная верификация предлагаемой модели проведена путем сравнения результатов ее применения с результатами применения известных аналитических моделей-прототипов [28, 43] для динамичного боя с параметрами:

- ВФ – самоходный артиллерийский дивизион, то есть $N_{кр}=N_{син}=18$;
- $N_{им_кр} = N_{им_син}=0$; $U = 1$;
- $P_{гар} = 0{,}94$ – на оценку «удовлетворительно»;
- $T_{р_кр} = T_{р_син} = 30$ с – время определения координат цели при первичном ее обнаружении или места взрыва снаряда при корректировке огня;
- $P_{р_кр} = P_{р_син} = 0{,}99$ – соответствует оптико-визуальной разведке цели;

- $T_{упр_кр} = T_{упр_син} = 20$ с – время оценки обстановки и распределения координат по средствам ОП;
- $T_{оп_кр} = T_{оп_син} = 30$ с – время на анализ координат, полученных от подсистемы разведки, и производство расчетов;
- $T_{1бп_кр} = T_{1бп_син} = 8$ с;
- $K_{бп_кр} = K_{бп_син} = \infty$;
- $P_{1бп_кр} = P_{1бп_син} = 0{,}3$ – соответствует классическим для артиллерии 8 снарядам на точечную цель при стрельбе с закрытой позиции;
- $P_{св_кр} = 0{,}9$;
- $T_{св_кр} = T_{св_син} = 30$ с;
- СКО для времен равно 10% (т.е. ± 5% от математического ожидания);
- подсистема ИТВ состоит из одного наземного средства.

**Первая модель-прототип** [28, 29] имеет следующий вид:

$$S_р = S_0 \cdot e^{-(1-c)\cdot v}, \tag{25}$$

где: $S_р$ и $S_0$ – результирующее и начальное соотношения БП, соответственно; $c$ – защищенность подсистемы управления от РЭП; $v$ – доля подавленных каналов передачи информации.

Для заданных условий в формуле (25) $S_0 = 1$. Экспоненциальный множитель в (25) характеризует ослабление стороны, подвергшейся РЭП (в заданных условиях Красных). С учетом этого выигрыш Синих оценивается по формуле:

$$\Delta N^*_{син} = 1 - e^{-(1-c)\cdot v}, \tag{26}$$

где: $\Delta N^*_{син}$ – остаточная доля численности Синих; $c$ – защищенность подсистемы управления Красных от РЭП; $v$ – доля подавленных Синими каналов передачи информации, т.е. $v = P_{итв}$.

На рис. 5 показаны результаты верификации для первой модели-прототипа применительно к случаю, когда защищенность подсистемы управления Красных от РЭП и уровень информатизации связаны зависимостью $c$=1–Δ.

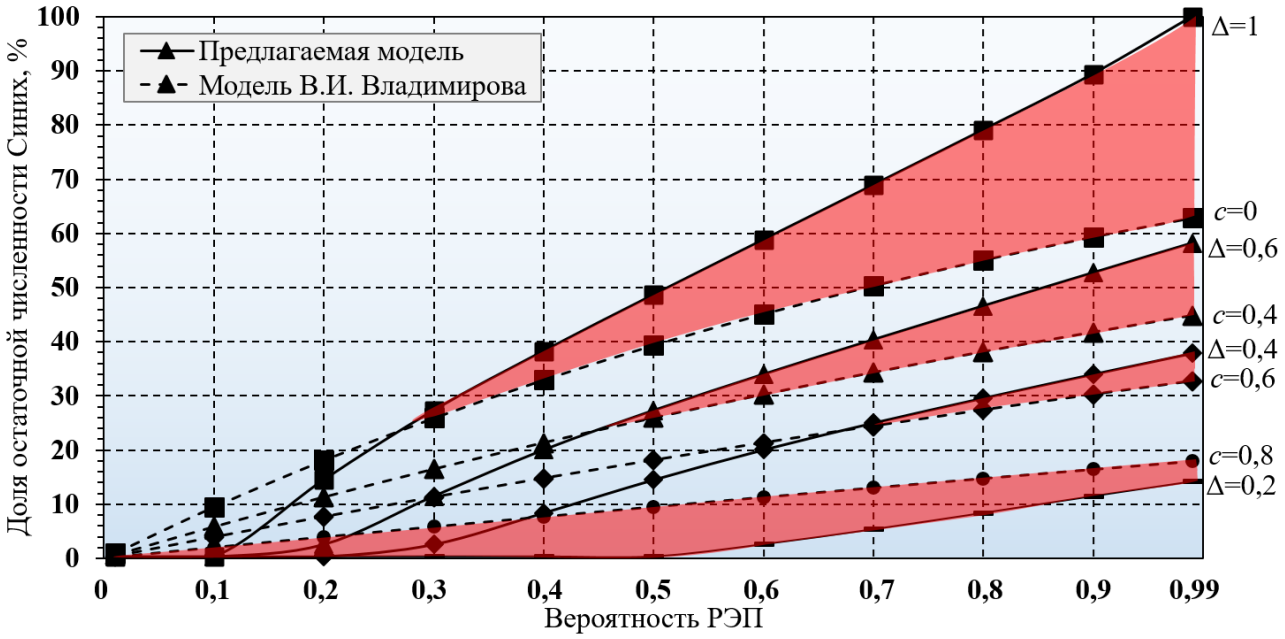


Рис. 5. Верификация для первой модели-прототипа (РЭП подсистемы связи)

Из анализа результатов сравнения моделей следует, что их оценки в целом сопоставимы, но максимальное отклонение результатов превышает 10% в основном при $\Delta > 0{,}7$. Такое различие, по всей видимости, обусловлено тем, что модель-прототип изначально ориентирована на оперативное звено, а предлагаемая модель ориентирована на тактическое звено.

**Вторая модель-прототип** – это уравнения Осипова-Ланчестера 2-го рода (линейный закон Ланчестера) [43], которые используются для оценки эффективности стрельбы по площадям и, в том числе, взяты за основу в работе [41]:

$$\begin{cases} B(t) = B_0 \cdot \dfrac{\beta \cdot R_0 - \gamma \cdot B_0}{\beta \cdot R_0 \cdot e^{(\beta \cdot R_0 - \gamma \cdot B_0) \cdot t} - \gamma \cdot B_0}; \\ R(t) = R_0 \cdot \dfrac{\gamma \cdot B_0 - \beta \cdot R_0}{\gamma \cdot B_0 \cdot e^{(\gamma \cdot B_0 - \beta \cdot R_0) \cdot t} - \beta \cdot R_0}, \end{cases} \tag{27}$$

где: $B_0$, $R_0$ и $B(t)$, $R(t)$ – численность Синих (Blue) и Красных (Red) в начале боя и в момент времени $t$, соответственно; $\gamma$ и $\beta$ – скорострельность (интенсивность выполнения задач поражения) одной боевой единицы Синих и Красных, соответственно, определяемые через среднее время выполнения задачи поражения одной боевой единицы $T$ ($\gamma = 1/T$).

Эта модель изначально ориентирована на тактическое звено. Для заданных условий боя (то есть $N=B_0=R_0$) система (27) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} B(t)[\%] = 100 \cdot \dfrac{(\beta\text{-}\Delta\beta_р) - \gamma}{(\beta\text{-}\Delta\beta_р) \cdot e^{((\beta\text{-}\Delta\beta_р) - \gamma) \cdot t} - \gamma}; \\ R(t)[\%] = 100 \cdot \dfrac{\gamma - (\beta\text{-}\Delta\beta_р)}{\gamma \cdot e^{(\gamma - (\beta\text{-}\Delta\beta_р)) \cdot t} - (\beta\text{-}\Delta\beta_р)}, \end{cases} \tag{28}$$

где $\Delta\beta_р$ – ослабление скорострельности Красных за счет тотального РЭП их подсистем разведки, связи и огневого поражения.

Для рассматриваемых условий боя существует аналитическое решение задачи оценки боевых потерь победивших Синих [43]:

$$\Delta B[\%] = 100 \cdot (1 - \gamma^{-1}(\beta - \Delta\beta_р) \cdot (1 - N_{крит_кр})), \tag{29}$$

где $N_{крит_кр}$ – критическое значение численности Красных, по достижении которого в бою они сдаются.

Пусть $N_{крит_кр} = 0$. Для рассматриваемых условий боя $\gamma = \beta$. Тогда

$$\Delta B[\%] = 100 \cdot \Delta\beta_р / \beta. \tag{30}$$

Поскольку показатель ослабления скорострельности за счет РЭП $\Delta\beta_р$ может принимать значение в диапазоне $[0, \beta]$, будем считать, что при $\Delta\beta_р = \beta$ вероятность РЭП подсистемы разведки Красных равна 1, а при $\Delta\beta_р = 0$ она равна 0. Допустим, значения $\Delta\beta_р$ и вероятности РЭП связаны зависимостью $\Delta\beta_р = \beta \cdot P_{ИТВ} \cdot \Delta$. Тогда на рис. 6 показано сравнение результатов применения предлагаемой модели и второй модели-прототипа для этой зависимости. Максимальное абсолютное отклонение результатов моделей для заданных условий боя составляет не более 4,7%. Вероятно, существуют исходные данные, которые дают и меньшее отклонение.

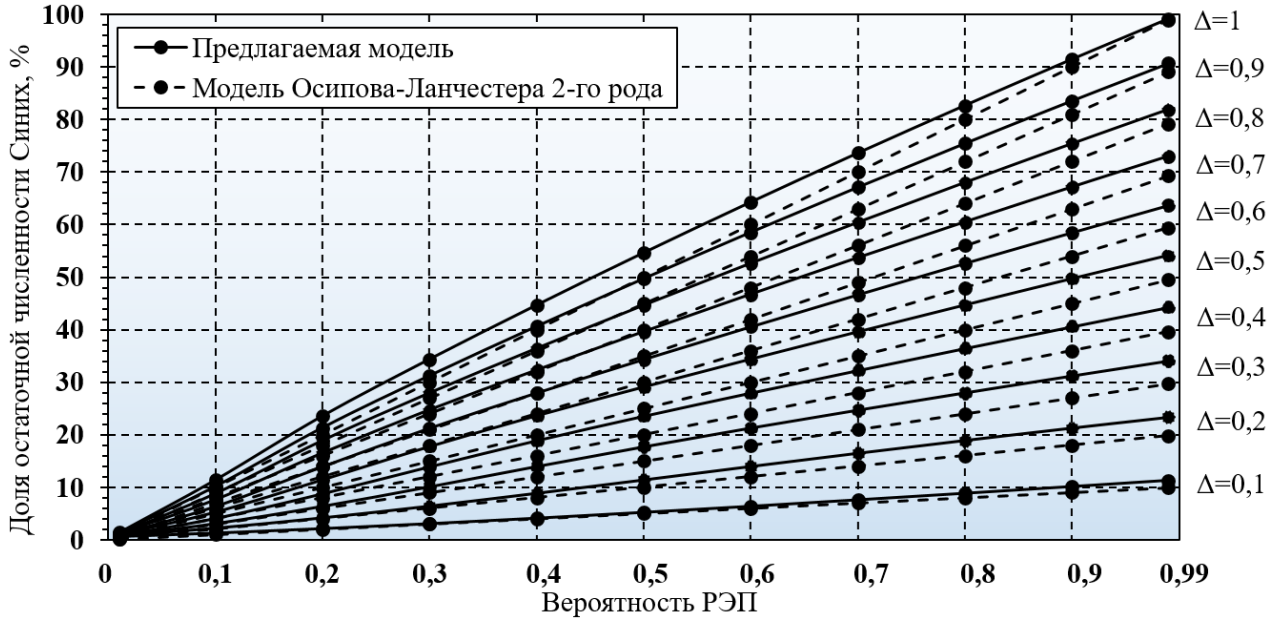


Рис. 6. Верификация для второй модели-прототипа (РЭП подсистемы разведки)

При увеличении $P_{1бп_кр} = P_{1бп_син}$ до уровня высокоточного оружия или уровня стрельбы с открытой огневой позиции результаты оценок предлагаемой модели и модели-прототипа существенно различаются. Это связано с тем, что вторая модель-прототип изначально разрабатывалась и верифицировалась для оценки эффективности стрельбы с закрытых позиций с применением обычного огнестрельного оружия.

**Третья модель-прототип** – это уравнения Осипова-Ланчестера 1-го рода (квадратичный закон Ланчестера) [43], которые используются для оценки БП ВФ при стрельбе с открытых огневых позиций:

$$\begin{cases} B(t) = B_0 \cdot \cosh\left(t \cdot \sqrt{\beta \cdot \gamma}\right) - \sqrt{\beta/\gamma} \cdot R_0 \cdot \sinh\left(t \cdot \sqrt{\beta \cdot \gamma}\right); \\ R(t) = R_0 \cdot \cosh\left(t \cdot \sqrt{\beta \cdot \gamma}\right) - \sqrt{\gamma/\beta} \cdot B_0 \cdot \sinh\left(t \cdot \sqrt{\beta \cdot \gamma}\right). \end{cases} \quad (31)$$

Для заданных условий боя система (31) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} B(t)[\%] = \cosh\left(t\sqrt{\left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right) \cdot \gamma}\right) - \sqrt{\left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right)/\gamma} \cdot \sinh\left(t\sqrt{\left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right) \cdot \gamma}\right); \\ R(t)[\%] = \cosh\left(t\sqrt{\left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right) \cdot \gamma}\right) - \sqrt{\gamma/\left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right)} \cdot \sinh\left(t\sqrt{\left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right) \cdot \gamma}\right). \end{cases} \quad (32)$$

Для этой системы уравнений также существует аналитическое решение задачи оценки боевых потерь победивших Синих [43]:

$$\Delta B[\%] = 100 \cdot \sqrt{1 - \gamma^{-1} \cdot \left(\beta\text{-}\Delta\beta_р\right) \cdot \left(1 - N_{крит_кр}\right)}. \quad (33)$$

Пусть $N_{крит_кр} = 0$. Для рассматриваемых условий боя $\gamma = \beta$. Тогда

$$\Delta B[\%] = 100 \cdot \sqrt{\Delta\beta_р/\beta}. \quad (34)$$

По аналогии с предыдущей моделью-прототипом предположим, что значения $\Delta\beta_р$ и вероятности РЭП связаны зависимостью $\Delta\beta_р = \beta \cdot P_{ИТВ} \cdot \Delta$. На рис. 7 показано сравнение результатов применения предлагаемой модели и третьей модели-прототипа при РЭП подсистем разведки и ОП для этой зависимости. Максимальное абсолютное отклонение составило 15%.

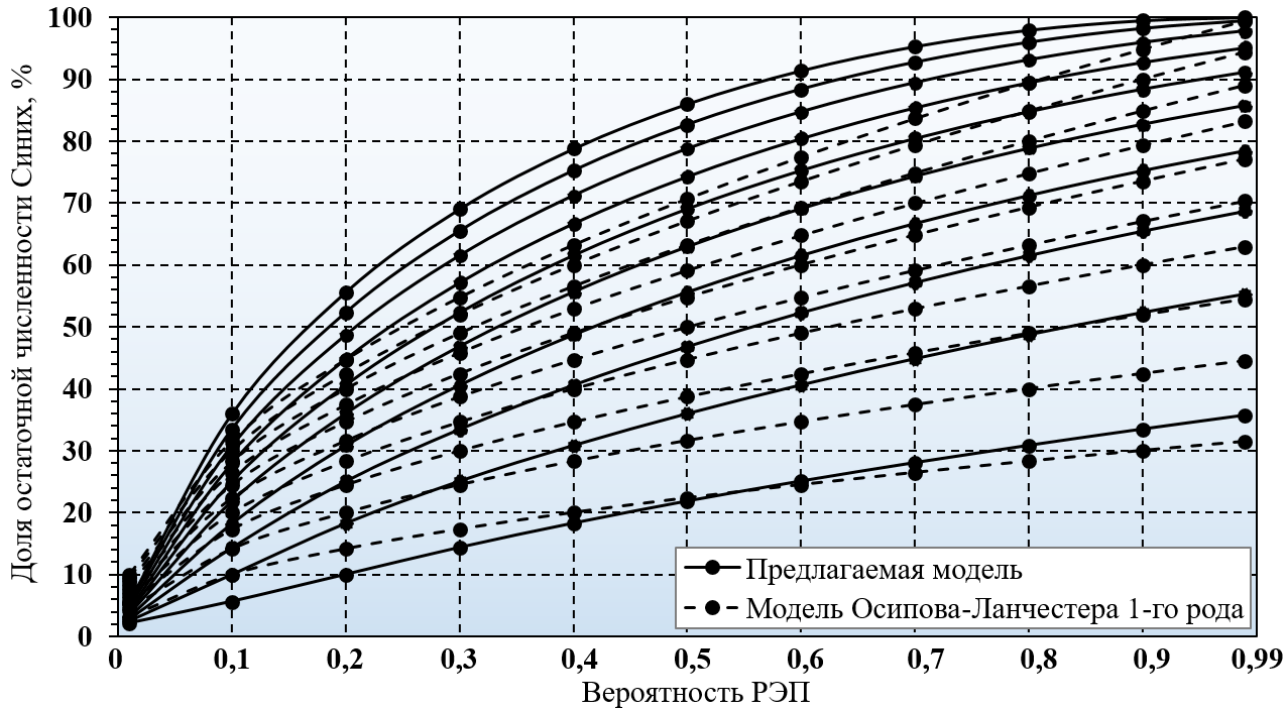


Рис. 7. Верификация для третьей модели-прототипа
(РЭП подсистем разведки и огневого поражения)

Следует заметить, что решения (29) и (33) применимы к т.н. «А-правилу» боя [43], предполагающему выход стороны из боя в случае достижения ее численности заданного порогового значения. Тем не менее, эти решения, адаптированные к условиям верификации в выражениях (30) и (34), полностью соответствуют адаптированным аналогичным образом решениям для «Р-правила», предполагающего выход стороны из боя в случае достижения заданного порогового соотношения численности сторон.

Результаты верификации на рис. 6-7 показывают, что имеет место несколько более сложная зависимость между исследуемыми параметрами. Она имеет вид $\Delta\beta_р = \beta \cdot y(P_{ИТВ}, \Delta)$, где $y$ – показательная функция. При этом, по всей видимости, линейный и квадратичный законы Ланчестера, характерные для войн от античности и до середины XX века, сегодня имеют более высокую степень, подчеркивающую существенно возросшие возможности современных средств разнохарактерного воздействия на противника в бою.

В целом результаты проведенной верификации могут быть признаны удовлетворительными. Они свидетельствуют о том, что при различных наборах исходных данных результаты предлагаемой модели с приемлемой точностью повторяют результаты известных моделей боя. По сути, это означает, что предлагаемый темпоральный подход к аналитическому моделированию боя дает возможность разрабатывать такие модели, которые можно считать обобщающими известные аналитические модели боя.

Рассмотрим возможности предлагаемого подхода. Для этого воспользуемся известным в военной истории эпизодом преодоления средствами воздушного нападения коалиции западных стран противовоздушной обороны (ПВО) Ирака во время начальной стадии операции «Буря в пустыне» в 1991 году. То-

гда коалицией был заблаговременно внедрен вирус «AF/91» в драйвер принтера, подключенного к информационно-управляющей сети иракской системы ПВО [5]. Учитывая недостаток достоверных исходных данных, можно предположить, что уровень информатизации сторон в том бою был не менее 80%. Соотношение численностей сторон в операции в целом военные историки оценивают на уровне 2,7:1. Вероятно, силы коалиции в этом бою имели большее преимущество, но будем исходить из наихудшего для них варианта, когда в начале операции соотношение было таким же. Оборонявшаяся сторона имела оборудованные позиции. Обеими сторонами применялось высокоточное оружие ($P_{1бп_кр}$=$P_{1бп_син}$=0,8), а оперативность боевых циклов (включая сетецентрический доступ к развединформации) и вероятность разведки средств воздушного нападения коалиции были не выше значений таких же параметров иракских средств ПВО советского производства.

Оценить уровень ослабления ущерба обороняемым позициям $U$ у иракских средств ПВО предлагается следующим образом. Известно, что в наиболее общем случае планирование боя предполагает потерю не более 25% численности наступающих ВФ [54]. Тогда, задавая соотношение численностей 6:1, модель позволяет определить значение $U$, при котором наступающие теряют 25% своей численности. Оно составляет 0,2. Зависимости остаточной численности коалиции при различных вероятностях КА на все подсистемы иракской ПВО для указанных исходных данных приведены на рис. 8.

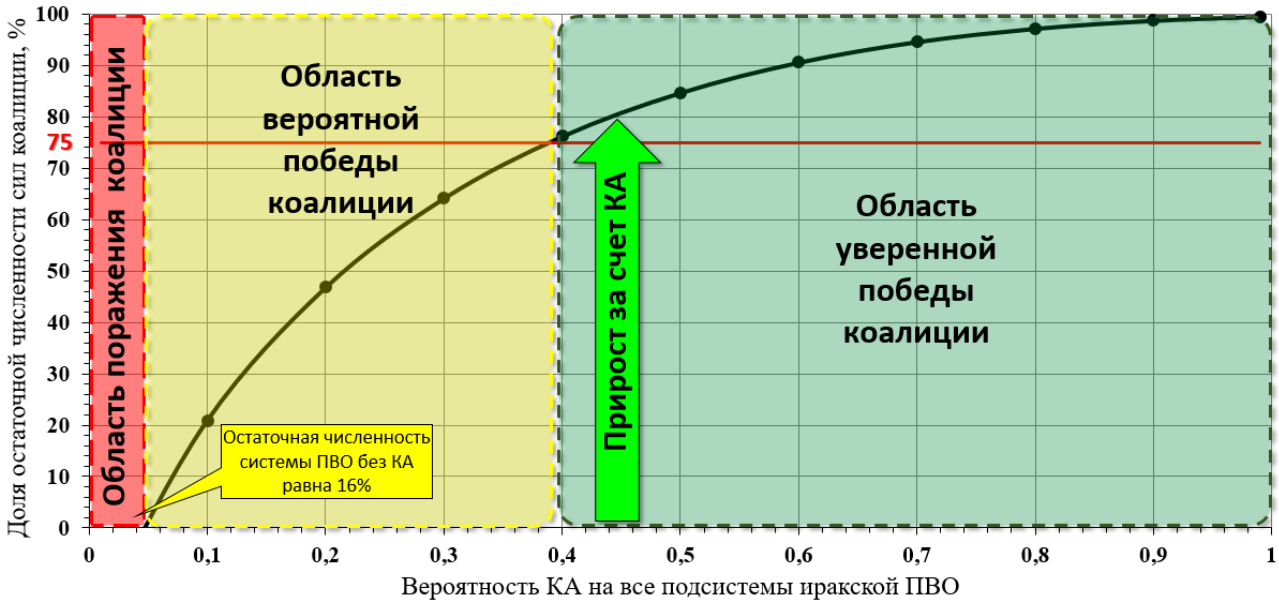


Рис. 8. Зависимость остаточной численности коалиции от вероятности КА на все подсистемы иракской ПВО

На рис. 8 показано, что без применения КА иракская система ПВО должна была бы победить с остаточной численностью 16%. КА обеспечивают победу коалиции даже в том случае, если вирус поразит от 5% до 40% иракской системы ПВО, а при поражении более 40% победа коалиции будет уверенной.

Безусловно, проведенные расчеты следует рассматривать только в качестве демонстрации возможности предлагаемого подхода к аналитическому мо-

делированию современного боя, так как достоверные исходные данные в открытых источника отсутствуют. Но даже при существенном расхождении исходных данных важность КА в рассмотренном бою недооценивать нельзя.

## Область применения результатов решения задачи

Предложенный подход может найти применение при разработке перспективных систем поддержки принятия решения тактического звена с использованием полномасштабной модели боевой обстановки, учитывающей местоположение элементов боевых порядков ВФ на поле боя, на основе применения метода боевых эпизодов, базис которого рассмотрен в предшествующем цикле работ автора [13-21].

В рамках рассматриваемого направления научных исследований дальнейшей проработки требуют следующие вопросы:

- разработка алгоритма расчета времен до уничтожения элементов боевых порядков в трехмерном пространстве на основе применения методов комбинаторики;
- сравнительный анализ эффективности основных факторов, влияющих на соотношение БП в современном общевойсковом бою, в интересах координации работы подсистем разведки, ИТВ и информационно-психологического воздействия на основе применения методов теории управления и теории многоуровневых иерархически упорядоченных систем.

Настоящая статья является первой частью материалов, рассматривающих методические основы оценки боевой эффективности КА на уровне соотношения БП противоборствующих ВФ. Исследованию практических аспектов применения КА в современном бою и обоснованию требований к защищенности образцов ВВТ от КА посвящена вторая часть этих материалов, изложенная в работе [55].

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложен темпоральный подход к аналитическому моделированию боя, в котором соотношение боевых потенциалов воинских формирований определяется не в виде эмпирической зависимости или отношения функционалов сторон, определяемых их численностями и интенсивностями воздействия на противника, а в виде отношения времени, требуемого для уничтожения выигравшей бой стороны, ко времени, потребовавшемуся для уничтожения проигравшей стороны с учетом достижения ею критического значения численности или соотношения сил, при котором она отказывается от дальнейшего сопротивления. Времена до уничтожения сторон вычисляются с учетом их взаимного влияния на боевые циклы противника, включающего огневое поражение, электромагнитное воздействие и кибератаки.

На основе предложенного темпорального подхода разработана аналитическая модель современного боя с применением кибератак, влияющих на время передачи сообщений в подсистеме связи, время выполнения операций в подсистеме управления, а также вероятность и время выполнения операций в подси-

стемах разведки и огневого поражения. Приведено сравнение результатов применения предложенной модели с эмпирической зависимостью Владимирова и аналитическими моделями боя Осипова-Ланчестера 1-го и 2-го рода. Установлено, что предлагаемый темпоральный подход позволяет разрабатывать аналитические модели современного боя, которые можно считать обобщающими известные аналитические модели боя.

Предложенный подход к аналитическому моделированию боя предлагается использовать в рамках метода боевых эпизодов в перспективных системах поддержки принятия решения тактического звена в интеграции с полномасштабной моделью боевой обстановки, учитывающей местоположение элементов боевых порядков воинских формирований на поле боя.

## Литература

1. Тасбулатов А. Б., Орлянский В. И. Разработка современной классификации видов и средств поражения – неотложная задача военной науки // Военная Мысль. 2007. № 4. С. 55-61.

2. Кларк Р., Нейк Р. Третья мировая война: какой она будет? – СПб.: Питер, 2011. – 336 с.

3. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.

4. Астапенко Ю. А., Вайпан С. Н., Вакуленко А. А., Вакуленко Н. Н., Верба Б. С., Грибков Р. А., Гузенко О. Б., Дод В. Н., Зайцев А. Г., Иванов А. Н., Ионкин А. А., Король О. В., Кузьмин Г. В., Лясковский В. Л., Марухленко А. С., Неплюев О. Н., Приступюк И. А., Проскурин В. И., Рюмшин А. Р., Самушкин А. Н., Сенчаков Г. В., Турко Н. И., Шевчук В. И., Шевчук Д. В., Ягольников С. В. Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы. Методы анализа и синтеза. – М.: Радиотехника, 2015. – 312 с.

5. Дроботун Е. Б., Бердышев В. П. Защита автоматизированных систем управления военного назначения от разрушающих программных воздействий // Военная Мысль. 2016. № 10. С. 15-19.

6. Костин Н. А. Методический подход к определению боевых потенциалов войсковых формирований // Военная Мысль. 2017. № 10. С. 44-48.

7. Антонов С. Г., Климов С. М. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий // Надежность. 2017. Т. 17. № 1 (60). С. 32-39.

8. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.

9. Бойко А. А., Балыбин В. А., Донсков Ю. Е. О терминологии в области радиоэлектронной борьбы в условиях современного информационного противоборства // Военная Мысль. 2013. № 9. С. 28-32.

10. Бойко А. А., Дьякова А. В. Способ разработки тестовых удаленных информационно-технических воздействий на пространственно распределенные

системы информационно-технических средств // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3. С. 84-92.

11. Леньшин А. В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. – Воронеж: Научная книга, 2014. – 590 с.

12. Бойко А. А., Храмов В. Ю. Модель информационного конфликта информационно-технических и специальных программных средств в вооруженном противоборстве группировок со статичными характеристиками // Радиотехника. 2013. № 7. С. 5-10.

13. Бойко А. А. Способ стратифицированного аналитического описания процесса функционирования информационно-технических средств // Информационные технологии. 2015. № 1. С. 35-42.

14. Бойко А. А., Будников С. А. Модель информационного конфликта специального программного средства и подсистемы защиты информации информационно-технического средства // Радиотехника. 2015. № 4. С. 136-141.

15. Бойко А. А. Способ аналитического моделирования процесса распространения вирусов в компьютерных сетях различной структуры // Труды СПИИРАН. 2015. № 5. С. 196-211.

16. Бойко А. А. О защищенности информации воинских формирований в современном вооруженном противоборстве // Военная Мысль. 2016. № 4. С. 38-51.

17. Бойко А. А., Дегтярев И. С. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 245-266.

18. Бойко А. А. Способ оценки уровня информатизации образцов вооружения // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 264-275. DOI: 1024411/2410-9916-2019-10116.

19. Бойко А. А. Способ аналитического моделирования боевых действий // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 1-27. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10201.

20. Бойко А. А. Метод разработки иерархических многоуровневых моделей для аналитической оценки соотношения сил воинских формирований // Военная Мысль. 2019. № 7. С. 104-113.

21. Бойко А. А., Иванников К. С., Кузнецов Д. А. Методика построения графоаналитической модели позиционной динамики боя на основе вероятностно-временной синхронизации действий элементов боевых порядков воинских формирований // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 24-48. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10202.

22. Бонин А. С., Горчица Г. И. О боевых потенциалах образцов ВВТ, формирований и соотношениях сил группировок сторон // Военная мысль. 2010. № 4. С. 61-67.

23. Военный энциклопедический словарь. – М.: Военное издательство, 2007. – 831 с.

24. Буравлев А. И., Цырендоржиев С. Р., Брезгин В. С. Основы методологического подхода к оценке боевых потенциалов образцов ВВТ и воинских формирований // Вооружение и экономика. 2009. № 3(7). С. 4-12.

25. Захаров Л. В., Богданов С. А. О выработке единых подходов к оценке боевых потенциалов // Военная Мысль. 1992. № 8-9. С. 42-49.

26. Коробейников А. С., Холуенко Д. В., Пасичник С. И. Эффективность группировки войск радиоэлектронной борьбы в ходе комплексного поражения информационно-управляющей системы противника // Военная Мысль. 2015. № 8. С. 30-34.

27. Ласточкин Ю. И., Ярыгин Ю. Н., Бывших Д. М. Методическое обеспечение обоснования способов боевого применения сил и средств радиоэлектронной борьбы при противодействии радиоэлектронной разведке в операциях объединений Сухопутных войск // Военная Мысль. 2018. № 6. С. 58-66.

28. Владимиров В. И., Владимиров И. В. Основы оценки конфликтно-устойчивых состояний организационно-технических систем (в информационных конфликтах). – Воронеж: ВАИУ, 2008. – 231 с.

29. Стучинский В. И. Методический подход к оценке влияния дезорганизации управления оперативными резервами на темп наступления противника // Военная Мысль. 2016. № 11. С. 43-49.

30. Михайлов Р. Л. Модель информационных контактов устройств телекоммуникаций информационно-телекоммуникационной системы специального назначения со средствами наблюдения и воздействия противостоящей стороны // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 3. С. 17–27. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-3-17-27.

31. Михайлов Р. Л. Двухуровневая модель координации подсистем радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 2. С. 43–50. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10040.

32. Михайлов Р. Л. Динамическая модель информационного конфликта информационно-телекоммуникационных систем специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 238-251. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10309.

33. Буравлев А. И., Тимофеев М. В. Анализ динамики противоборства однородных группировок при различных стратегиях огневых воздействий // Вооружение и экономика. 2011. № 3(15). С. 17-22.

34. Буравлев А. И., Горшков П. С. К вопросу о построении агрегированной модели противоборства группировок войск // Вооружение и экономика. 2017. № 5(42). С. 35-48.

35. Дубограй И. В., Рябцев Р. А., Чуев В. Ю. Вероятностные модели двусторонних боевых действий многочисленных группировок при упреждающем ударе одной из них // Известия РАРАН. 2017. № 4. С. 37-46.

36. Алексеев О. Г., Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г. Марковские модели боя. – М.: МО СССР, 1985. – 85 с.

37. Митюков Н. В. Имитационное моделирование в военной истории. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 280 с.

38. Белотелов Н. В., Бродский Ю. И., Павловский Ю. Н. Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ: Исследование

исторических, военных, социально-экономических и политических процессов. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 320 с.

39. Черноскутов А. И., Ситкевич А. В. Оценка результатов боевых действий при поочередном уничтожении группировок противника // Стратегическая стабильность. 2012. № 3 (60). С. 51-55.

40. Черноскутов А. И., Ситкевич А. В., Тришкин В. С. Рациональный способ уничтожения разнородных группировок // Военная Мысль. 2018. № 1. С. 63-67.

41. Taylor J. G. Lanchester-Type Models of Warfare. Volume II. – Monterey: Naval Postgraduate School Publ., 1980. – 814 p.

42. Washburn A., Kress M. Combat Modeling. – London: Springer, 2009. – 281 p.

43. Jaiswal N. K. Military operations research: quantitative decision making. – N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 1997. – 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-6275-7.

44. Прохоров Д. В. Влияние эффективности и живучести подразделения радиоэлектронной борьбы на успех боя соединения Сухопутных войск // Военная Мысль. 2020. № 3. С. 96-102.

45. Динер И. Я. Исследование операций. – Ленинград: ВМОЛУА, 1969. – 606 с.

46. Губарев В. А., Козирацкий Ю. Л., Шляхин В. М. Особенности моделирования сложного коалиционного конфликта в условиях противодействия // Радиотехника. 1997. № 6. С. 43-46.

47. Будников С. А., Козирацкий Ю. Л., Паринов М. Л. Обобщенная модель конфликта основных систем вооружения // Вооружение и экономика. 2011. № 1(13). С. 13-23.

48. Будников С. А., Гревцев А. И., Иванцов А. В., Кильдюшевский В. М., Козирацкий А. Ю., Козирацкий Ю. Л., Кущев С. С., Лысиков В. Ф., Паринов М. Л., Прохоров Д. В. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. – М.: Радиотехника, 2013. – 232 с.

49. Козирацкий Ю. Л., Иванцов А. В. Оценка оперативности выполнения противником циклических задач поражения в условиях противодействия его техническим средствам разведки // Вооружение и экономика. 2014. № 1(26). С. 34-38.

50. Козирацкий Ю. Л., Паринов М. Л., Албузов А. Т., Иванцов А. В. Полумарковская модель конфликта противоборствуюих группировок малых численностей // Радиотехника. 2017. № 9. С. 6-11.

51. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.

52. Арбузов И. В., Болховитинов О. В., Волочаев О. В., Вольнов И. И., Гостев А. В., Мышкин Л. В., Хабиров Р. Н., Шеховцов В. Л. Боевые авиационные комплексы и их эффективность. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.

53. Чикин М. Г. Метод аналитического описания процессов с дискретным множеством состояний и не показательными распределениями времен

переходов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004. №5. С. 8-11.

54. Дорохов В. Н., Ищук В. А. Боевые потенциалы подразделений как интегральный критерий оценки боевых возможностей воинских формирований и боевой эффективности вооружения, военной и специальной техники // Известия РАРАН. 2017. № 4. С. 27-36.

55. Бойко А. А. Боевая эффективность кибератак: практические аспекты // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 134-162. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10405.

## References

1. Tasbulatov A. B., Orljanskij V. I. Razrabotka sovremennoj klassifikacii vidov i sredstv porazhenija neotlozhnaja zadacha voennoj nauki [The Development of a Modern Classification of Types and Means of Destruction is an Urgent Task of Military Science]. *Military Thought*, 2007, no. 4, pp. 55-61 (in Russian).

2. Klark R., Nejk R. *Tret'ja mirovaja vojna: kakoj ona budet*? [World war III: what will it be like?]. Saint-Petersburg, PITER Publ., 2011. 336 p. (in Russian).

3. Kuprijanov A. I., Shustov L. N. *Radiojelektronnaja bor'ba. Osnovy teorii* [Electronic warfare. Fundamentals of the theory]. Moscow, Vuzovskaja kniga Publ., 2011. 800 p. (in Russian).

4. Astapenko Yu. A., Vajpan S. N., Vakulenko A. A., Vakulenko N. N., Verba B. C., Gribkov R. A., Guzenko O. B., Dod V. N., Zajcev A. G., Zebzeev A. A., Ivanov A. N., Ionkin A. A., Korol' O. V., Kuz'min G. V., Lyaskovskij B. L., Maruhlenko A. S., Neplyuev O. N., Pristupyuk I. A., Proskurin V. I., Ryumshin A. R., Samushkin A. N., Senchakov G. V., Turko N. I., Shevchuk V. I., Shevchuk D. V., Yagol'nikov S. V. *Konfliktno-ustojchivye radioelektronnye sistemy. Metody analiza i sinteza* [Conflict-Resistant Electronic Systems. Methods of Analysis and Synthesis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015, 312 p. (in Russian).

5. Drobotun E. B., Berdyshev V. P. Zashhita avtomatizirovannyh sistem upravlenija voennogo naznachenija ot razrushajushhih programmnyh vozdejstvij [Protection of Military Automated Control Systems from the Software Destructive Influences]. *Military Thought*, 2016, no. 10, pp. 15-19 (in Russian).

6. Kostin N. A. Metodicheskij podhod k opredeleniju boevyh potencialov vojskovyh formirovanij [A Methodical Approach to Determining the Combat Potentials of Military Formations]. *Military Thought*, 2017, no. 10, pp. 44-48 (in Russian).

7. Antonov S. G., Klimov S. M. Metodika ocenki riskov narusheniya ustojchivosti funkcionirovaniya programmno-apparatnyh kompleksov v usloviyah informacionno-tekhnicheskih vozdejstvij [The Methods of Risk Assessment of the Stability of the Functioning of Software-hardware Systems in Terms of Information-Technical Impacts]. *Reliability*, 2017, vol. 17, no. 1 (60), pp. 32-39 (in Russian).

8. Makarenko S. I. *Modeli sistemy svjazi v uslovijah prednamerennyh destabilizirujushhih vozdejstvij i vedenija razvedki* [Models of the Communication System in the Conditions of Deliberate Destabilizing Influences and Intelligence]. Saint-Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2020. 337 p. (in Russian).

9. Boyko A. A., Balybin V. A., Donskov Yu. E. O terminologii v oblasti radioelektronnoj bor'by v usloviyah sovremennogo informacionnogo protivoborstva [About the Terminology in the Field of Electronic Warfare in the Modern Information Warfare]. *Military Thought*, 2013, no. 9, pp. 28-32 (in Russian).

10. Boyko A. A., Djakova A. V. The Method of Developing Test Remote Information-Technical Impacts on Spatially Distributed Systems of Information-Technical Tools. *Information and Control Systems*, 2014, no. 3, pp. 84-92 (in Russian).

11. Len'shin A. V. *Bortovye sistemy i kompleksy radiojelektronnogo podavlenija* [On-Board Systems and Electronic Suppression Systems]. Voronezh, Science Book Publ., 2014. 590 p. (in Russian).

12. Boyko A. A., Hramov V. Yu. The Model of Information Conflict between Information-Technical Means and Special Software in Armed Confrontation of Groups with Static Characteristics. *Radiotekhnika*, 2013, no. 7, pp. 5-10 (in Russian).

13. Boyko A. A. Sposob stratificirovannogo analiticheskogo opisaniya processa funkcionirovaniya informacionno-technicheskih sredstv [The Stratified Analytical Description Method of the Functioning Process of Information-Technical Tools]. *Informacionnye Tehnologii*, 2015, no. 1, pp. 35-42 (in Russian).

14. Boyko A. A., Budnikov S. A. The Model of Information Conflict between Special Software and Information Security Subsystem of Information-Technical Tool. *Radiotekhnika*, 2015, no. 4, pp. 136-141 (in Russian).

15. Boyko A. A. The Analytical Modeling Method of the Virus Propagation Process in Computer Various Structures Networks. *SPIIRAS Proceedings*, 2015, no. 5, pp. 196-211 (in Russian).

16. Boyko A. A. O zashishennosti informacii voinskih formirovaniy v sovremennom vooruzhennom protivoborstve [About the Information Security of Military Formations in the Modern Armed Confrontation]. *Military Thought*, 2016, no. 4, pp. 38-51 (in Russian).

17. Boyko A. A., Degtyarev I. S. The Weight Coefficient Estimation Method of Elements in Organizational and Technical Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 2, pp. 245-266 (in Russian).

18. Boyko A. A. Evaluation method of armament samples informatization level. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 1, pp. 264-275. (in Russian). DOI: 1024411/2410-9916-2019-10116.

19. Boyko A. A. Warfare Analytical Modeling Method. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 1-27. (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10201.

20. Boyko A. A. The Method of Developing Hierarchic Multilevel Models for Analytical Assessment of the Correlation of Forces in Military Formations. *Military Thought*, 2019, no. 7, pp. 104-113 (in Russian).

21. Boyko A. A., Ivannikov K. S., Kuznetsov D. A. Constructing Graphoanalytic Combat Positional Dynamics Model Based on Military Formations Combat Orders Elements Actions Probability-Temporal Synchronization. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 24-48. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10202 (in Russian).

22. Bonin A. S., Gorchica G. I. O boevyh potencialah obrazcov VVT, formirovanij i sootnoshenijah sil gruppirovok storon [On the Combat Potential of Military Hardware Samples, Formations, and the Ratio of Forces of the Parties' Groups]. *Military Thought*, 2010, no. 4, pp. 61-67 (in Russian).

23. *Voennyj jenciklopedicheskij slovar'* [Military encyclopedic dictionary]. Moscow, Voenizdat Publ., 2007. 831 p. (in Russian).

24. Buravlev A. I., Cyrendorzhiev S. R., Brezgin V. S. Osnovy metodologicheskogo podhoda k ocenke boevyh potencialov obrazcov VVT i voinskih formirovanij [Bases of the Methodological Approach to an Estimation of Fighting Potentials of Samples of Arms and the Military Technics and Military Formations]. *Armament and Economics*, 2009, no. 3(7), pp. 4-12 (in Russian).

25. Zakharov L. V., Bogdanov S. A. O virabotke edinih podhodov k ocenke boevih potencialov [On the Development of Unified Approaches to the Assessment of Combat Potentials]. *Military Thought*, 1992, no. 8-9, pp. 42-49 (in Russian).

26. Korobeynikov A. S., Kholuenko D. S., Pasichnik S. I. Effektivnost' Gruppirovki Voisk Radioelektronnoi Bor'by v Khode Kompleksnogo Porazheniia Informatsionno-upravliaiushchei Sistemy Protivnika [The Effectiveness of the Grouping of Electronic Warfare Troops in the Course of the Complex Destruction of the Information and Control System of the Enemy]. *Military Thought*, 2015, no. 8, pp. 30-34 (in Russian).

27. Lastochkin Ju. I., Jarygin Ju. N., Byvshih D. M. Metodicheskoe obespechenie obosnovanija sposobov boevogo primenenija sil i sredstv radiojelektronnoj bor'by pri protivodejstvii radiojelektronnoj razvedke v operacijah ob#edinenij Suhoputnyh vojsk [Methodological Support for Substantiation of Combat Employment of Electronic Warfare Forces and Means in Countering Radio Electronic Reconnaissance in Operations of Land Force's Associations]. *Military Thought*, 2018, no. 6, pp. 58-66 (in Russian).

28. Vladimirov V. I., Vladimirov I. V. *Osnovy Otsenki Konfliktno-ustoichivykh Sostoianii Organizatsionno-tekhnicheskikh Sistem* (*v Informatsionnykh Konfliktakh*) [Basics of Assessing Conflict-resistant States of Organizational and Technical Systems (in Information Conflicts)]. Voronezh, Military Aviation Engineering University Publ., 2008. 231 p. (in Russian).

29. Stuchinskij V. I. Metodicheskij podhod k ocenke vlijanija dezorganizacii upravlenija operativnymi rezervami na temp nastuplenija protivnika [Methodical Approach to Assessing the Influence of Disruption of Operational Reserves' Control to the Rate of the Enemy's Advance]. *Military Thought*, 2016, no. 11, pp. 43-49 (in Russian).

30. Mikhailov R. L. The Model of Information Contacts Between Telecommunication Devices of Special Purpose Infocommunication System and Opposing Side Means of Monitoring and Impact. *Proc. of Telecom. Universities*, 2020, no. 6(3), pp. 17-27. (in Russian). DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-3-17-27.

31. Mikhailov R. L. Two-level model of coordination of subsystems of radiomonitoring and electronic warfare. H*&ES Research*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 43-50. (In Russian). DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10040.

32. Mikhailov R. L. Informational conflict of informational-telecommunication systems of special purpose dynamic model. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 238-251 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10309.

33. Buravlev A. I., Timofeev M. V. Analiz dinamiki protivoborstva odnorodnyh gruppirovok pri razlichnyh strategijah ognevyh vozdejstvij [The Analysis of Dynamics of Confrontation Homogeneous Groups with Different Strategies of Fire Impact]. *Armament and Economy*, 2011, no. 3 (15), pp. 17-22 (in Russian).

34. Buravlev A. I., Gorshkov P. S. K Voprosu o postroenii agregirovannoi modeli protivoborstva gruppirovok voisk [On the Issue of Building an Aggregated Model of Confrontation between Groups of Troops]. *Armament and Economy*, 2017, no. 5(42), pp. 35-48 (in Russian).

35. Dubograj I. V., Rjabcev R. A., Chuev V. Ju. Verojatnostnye modeli dvustoronnih boevyh dejstvij mnogochislennyh gruppirovok pri uprezhdajushhem udare odnoj iz nih [Probabilistic Models of Bilateral Actions of Numerous Groups with a Preemptive Strike of One of Them]. *Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk*, 2017, no. 4, pp. 37-46 (in Russian).

36. Alekseev O. G., Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Markovskie modeli boia* [Markov Battle Models]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR Publ., 1985. 85 p. (in Russian).

37. Mitiukov N. V. *Imitatsionnoe modelirovanie v voennoi istorii* [Simulation in Military History]. Moscow, LENAND Publ., 2018. 280 p. (in Russian).

38. Belotelov N. V., Brodskij Ju. I., Pavlovskij Ju. N. *Slozhnost'. Matematicheskoe modelirovanie. Gumanitarnyj analiz: Issledovanie istoricheskih, voennyh, social'no-jekonomicheskih i politicheskih processov* [Complexity. Mathematical Modeling. Humanitarian Analysis: The Study of Historical, Military, Socio-Economic and Political Processes]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2013. 320 p. (in Russian).

39. Chernoskutov A. I., Sitkevich A. V. Ocenka rezul'tatov boevyh dejstvij pri poocherednom unichtozhenii gruppirovok protivnika [Evaluation of the results of combat operations during the successive destruction of enemy groups]. *Strategic Stability*, 2012, no. 3(60), pp. 51-55 (in Russian).

40. Chernoskutov A. I., Sitkevich A. V., Trishkin V. S. Ratsional'nyi Sposob Unichtozheniia Raznorodnykh Gruppirovok [Rational Way to Destroy Dissimilar Groups]. *Military Thought*, 2018, no. 1, pp. 63-67 (in Russian).

41. Taylor J. G. *Lanchester-Type Models of Warfare. Volume II*. Monterey, Naval Postgraduate School Publ., 1980. 814 p.

42. Washburn A., Kress M. *Combat Modeling*. London, Springer Publ., 2009. 281 p.

43. Jaiswal N. K. *Military operations research: quantitative decision making*. New York, Kluwer Academic Publ., 1997. 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-6275-7.

44. Prohorov D. V. Vlijanie jeffektivnosti i zhivuchesti podrazdelenija radiojelektronnoj bor'by na uspeh boja soedinenija Suhoputnyh vojsk [How the

Efficiency and Survivability of Electronic Warfare Units Affect the Fighting Success of Ground Force Units]. *Military Thought*, 2020, no. 3, pp. 96-102 (in Russian).

45. Diner I. Ja. *Operation research*. Leningrad, VMOLUA Publ., 1969. 606 p. (in Russian).

46. Koziratsky Yu. L., Gubarev V. A., Shlyakhin V. M. Osobennosti modelirovaniya slozhnogo koalitsionnogo konflikta v usloviyakh protivodeystviya [Features of modeling a complex coalition conflict under counteraction conditions]. *Radiotekhnika*, 1997, no. 6, pp. 43-46 (in Russian).

47. Budnikov S. A., Koziratskii Iu. L., Parinov M. L. Obobshchennaia Model' Konflikta Osnovnykh Sistem Vooruzheniia [The Generalized Conflict Model of the Main Weapons Systems]. *Armament and Economy*, 2011, no. 1 (13), pp. 13-23 (in Russian).

48. Budnikov S. A., Grevcev A. I., Ivancov A. V., Kil'dyushevskij V. M., Kozirackij A. Yu., Kozirackij Yu. L., Kushchev S. S., Lysikov V. F., Parinov M. L., Prohorov D. V. *Modeli Informatsionnogo Konflikta Sredstv Poiska i Obnaruzheniia* [Models of Information Conflict of Search and Detection Tools]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 232 p. (in Russian).

49. Koziratskii Iu. L., Ivantsov A. V. Otsenka Operativnosti Vypolneniia Protivnikom Tsiklicheskikh Zadach Porazheniia v Usloviiakh Protivodeistviia ego Tekhnicheskim Sredstvam Razvedki [Evaluation of the Efficiency of the Enemy Performing the Cyclical Tasks of Defeat in the Conditions of Counteraction Against his Technical Intelligence]. *Armament and Economy*, 2014, no. 1 (26), pp. 34-38 (in Russian).

50. Kozirackij Ju. L., Parinov M. L., Albuzov A. T., Ivancov A. V. Polumarkovskaja model' konflikta protivoborstvujushhih gruppirovok malyh chislennostej [Semi-Markov Model of Conflict Between Opposing Groups of Small Numbers]. *Radiotekhnika*, 2017, no. 9, pp. 6-11 (in Russian).

51. Aliev T. I. *Osnovy modelirovanija diskretnyh system* [Fundamentals of modeling discrete systems]. Saint-Petersburg, ITMO Publ., 2009. 363 p. (in Russian).

52. Arbuzov I. V., Bolhovitinov O. V., Volochaev O. V., Vol'nov I. I., Gostev A. V., Myshkin L. V., Habirov R. N., SHekhovcov V. L. *Boevye aviacionnye kompleksy i ih effektivnost'* [Combat Aircraft Systems and their Effectiveness]. Moscow, Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publ., 2008. 224 p. (in Russian).

53. Chikin M. G. Metod analiticheskogo opisanija processov s diskretnym mnozhestvom sostojanij i ne pokazatel'nymi raspredelenijami vremen perehodov [Method of Analytical Description of Processes with a Discrete Set of States and Exponential Distributions of Times of Transitions]. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2004, no. 5, pp. 8-11 (in Russian).

54. Dorohov V. N., Ishhuk V. A. Boevye potencialy podrazdelenij kak integral'nyj kriterij ocenki boevyh vozmozhnostej voinskih formirovanij i boevoj jeffektivnosti vooruzhenija, voennoj i special'noj tehniki [Combat Potential of Units, as Integral Criterion of Estimation of Military Formations, Combat Effectiveness of Armament and Military Equipment Operational Capability]. *Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk*, 2017, no. 4, pp. 27-36 (in Russian).

55. Boyko A. A. Combat Effectiveness of Cyber-attacks: Practical Aspects. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 134-162. (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10405.

**Статья поступила 20 ноября 2020 г.**

## Информация об авторе

*Бойко Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент. Докторант. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: защита информации, моделирование сложных систем. E–mail: albo@list.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, д. 54А.

---

# Combat Effectiveness of Cyber-attacks: Analytical Modeling of Modern Warfare

A. A. Boyko

***Problem Statement.*** *In modern warfare and armed conflicts cyber-attacks are used at the channel and higher levels of the OSI model. It is necessary to justify the requirements for the protection of weapons and military equipment from these attacks. However, well-known analytical warfare models used to assess the electromagnetic impacts combat effectiveness do not allow to take into account the possibilities of cyber-attacks associated with simultaneous influence on the time and probability functioning characteristics of the military formation subsystems.* ***Aim of the paper*** *is to develop an analytical warfare model that allows to quantify the cyber-attacks effectiveness at the level of opposing military formations combat potentials ratio.* ***The idea*** *is to propose the temporal approach to analytical warfare modeling, in which the military formations combat potentials ratio is not determined in the form of empirical relationships or functional parties' relationships, determined by their numbers and intensity of impact on the enemy. In proposed temporal approach it is determined as a ratio of the winning side destruction time to the losing side destruction time. The destruction times of sides are calculated taking into account their mutual influence on the enemy's combat cycles (from the beginning of the reconnaissance process to the end of the target firing process). This influence includes fire destruction, electromagnetic impacts, and cyber-attacks. If necessary, the combat divides into episodes, in each of which the destruction speed of each side is a constant.* ***Novelty*** *in taking into account the cyber-attacks effect on the time and probability functioning characteristics of intelligence, communications, control and fire destruction subsystems when they are used together in the military formation combat cycle.* ***Result.*** *Based on the proposed temporal approach, developed an analytical warfare model with the use of cyber-attacks that affect the time of message transmission in the communication subsystem, the time of operations in the control subsystem, the probability and time of operations in the intelligence and fire destruction subsystems. The comparison results of the proposed model with the Vladimirov empirical dependence and Osipov-Lanchester analytical warfare models are obtained. It is established that the proposed temporal approach allows to develop analytical warfare models, which can be considered generalizing the known analytical warfare models.* ***Practical relevance.*** *The solution can be used in tactical decision support systems.*

***Keywords:*** *analytical warfare model, cyber-attack, combat potentials ratio, military formation, combat cycle*

## Information about Author

*Aleksey Aleksandrovich Boyko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Doctoral Candidate. Zhukovsky and Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: methods and systems of information protection, methods of assessing the effectiveness of complex systems. E–mail: albo@list.ru

Address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Street, 54A.