УДК 004.02

Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем

Бойко А. А., Дегтярёв И. С.

Постановка задачи: *оценка весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем используется при решении широкого спектра задач (например, задачи выявления эффективных подразделений в крупных организациях, определения приоритетных целей для поражения в вооруженном противоборстве, вскрытия «узких» мест в пространственно распределенных телекоммуникационных системах). Известны два метода такой оценки: эмпирический, обладающий низкой точностью, и натурный, требующий значительных затрат ресурсов и большого количества статистических результатов функционирования системы для различных условий.* ***Целью работы*** *является повышение точности результатов оценки весовых коэффициентов сложных организационно-технических систем с одновременным снижением количества затрачиваемых для этого ресурсов.* ***Используемые методы****: идея предложенного метода состоит в назначении всем элементам системы одинакового усредненного веса, последовательном вычислении значений показателя целевой функции системы без каждого из своих элементов и вычислении реального весового коэффициента каждого элемента по величине ущерба целевой функции, наносимого исключением этого элемента.* ***Новизна:*** *новизна представленного решения состоит в создании аналитического метода оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем, учитывающего комплекс эффектов от применения их элементов на уровне системной целевой функции, которая рассчитывается с использованием этих же весовых коэффициентов.* ***Результат****: использование представленного решения в математических моделях процессов функционирования сложных организационно-технических систем позволяет исключить необходимость учета человеческого фактора и проведения натурных экспериментов при определении весов элементов этих систем. Решение обеспечивает присущую аналитическим методам общность и точность результатов оценки весовых коэффициентов сложных организационно-технических систем.* ***Практическая значимость****: представленное решение реализовано в аналитической модели общевойскового боя в виде программного комплекса, аналогичного по задачам элементу программного обеспечения типа «Блицкриг», которое используется в автоматизированной системе управления войсками США FBCB2. Предложенный метод в модели используется для решения задачи оценки весовых коэффициентов элементов боевого порядка воинских формирований в вооруженном противоборстве. С применением метода установлены подтверждаемые практикой закономерности боевого применения средств огневого поражения, разведки и радиоэлектронного подавления в современном вооруженном противоборстве.*

Ключевые слова: *метод последовательных исключений, весовой коэффициент, элемент, организационно-техническая система, целевая функция, моделирование вооруженного противоборства.*

Введение

Оценка весовых коэффициентов элементов сложных организационно-технических систем (далее – ОТС), к которым относятся, например, крупные

Библиографическая ссылка на статью:
Бойко А. А., Дегтярёв И. С. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 245–266. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/12-Boyko.pdf

Reference for citation:
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. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/12-Boyko.pdf (in Russian).

организации, пространственно распределенные телекоммуникационные системы, имеет важное значение при решении широкого спектра задач. Эти коэффициенты применяются в аналитических свертках различного вида для вычисления значений целевой функции ОТС, конфликтное взаимодействие (в том числе информационное) элементов которой друг с другом и с элементами других ОТС трудно спрогнозировать. Элементом ОТС может быть, например, структурное подразделение организации или узловой элемент телекоммуникационной системы, а под целевой функцией ОТС понимается мера соответствия этой системы целям ее существования.

Весовые коэффициенты могут иметь также самостоятельное значение. Например, при выявлении эффективных подразделений в крупных организациях, определении приоритетных целей для поражения в вооруженном противоборстве, вскрытии «узких» мест в пространственно распределенных телекоммуникационных системах. В этом случае в явном или неявном виде также существует аналитическая свертка для вычисления целевой функции ОТС.

В обоих случаях при анализе ОТС на практике приходится сталкиваться с объективной проблемой учета разнородных факторов и процессов, оказывающих влияние на целевую функцию системы.

Постановка задачи

Результаты анализа известных работ в области оценки весовых коэффициентов ОТС показали, что эта задача решается с использованием двух основных методов:

- эмпирический метод [1-7] предусматривает ранжировку, парные сравнения и шкальные оценки исходной информации об ОТС с последующим определением экспертами весов на основе личного опыта и без учета результатов ее реального функционирования. Практика показывает, что этот метод является основным в подавляющем большинстве систем поддержки принятия решений. Однако, общеизвестно, что даже группе квалифицированных экспертов крайне трудно преодолеть проблему «взрыва» пространства факторов и состояний анализируемых процессов в ОТС, тем более, если эти процессы нестационарные;
- натурный метод [8-12] предполагает определение весовых коэффициентов элементов ОТС по результатам анализа процесса ее реального функционирования. Этот метод требует часто недоступных значительных ресурсных затрат и большого количества статистических результатов функционирования ОТС для различных условий. К тому же для подавляющего большинства ОТС требуется оценка весовых коэффициентов элементов до начала функционирования этих систем. Например, в вооруженном противоборстве при выборе приоритетных целей для огневого поражения, очевидно, нельзя дожидаться удара противника, поскольку своих боеспособных средств огневого поражения после этого удара уже может не быть.

Следует отметить, что в имитационных, в том числе мультиагентных, моделях весовые коэффициенты на практике не находят своего применения. Это

обусловлено, с одной стороны, возможностью получения с помощью таких моделей значений целевой функции напрямую без весовых коэффициентов. На основе этих значений возможно оценить вклад и, соответственно, вес каждого элемента системы. С другой стороны, общеизвестно, что результаты статистического моделирования ОТС даже при неизменных начальных условиях могут существенно различаться. Это способно привести к дорогостоящим ошибкам при принятии важных для ОТС решений. Методы определения весовых коэффициентов элементов ОТС с использованием только аналитических моделей без применения экспертных оценок отсутствуют. Это связано с тем, что получить аналитические выражения возможно только для численных значений показателей, характеризующих отдельные свойства элементов ОТС, а обобщение отдельных свойств элементов в весовые коэффициенты этих элементов неизбежно будет производиться эмпирическим или натурным методами, имеющими указанные выше недостатки.

Цель работы – *разработка аналитического метода оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем, учитывающего комплекс эффектов от применения их элементов на уровне системной целевой функции, которая рассчитывается с использованием этих же весовых коэффициентов.*

Содержание метода

Предлагаемый метод предполагает наличие для ОТС аналитической модели, обеспечивающей возможность вычисления ее целевой функции с использованием весовых коэффициентов элементов, входящих в систему, и учитывающей комплекс эффектов от применения этих элементов. Такая модель для ОТС может быть разработана в том случае, если ОТС возможно представить в виде совокупности взаимосвязанных элементов, и она обеспечивает достижение цели, критерий достижимости которой задается численно.

Идея метода состоит в следующем. Полагается, что каждая ОТС выполняет некоторую работу для достижения заданной цели. Каждый элемент выполняет долю работы ОТС, соответствующую своему весовому коэффициенту. Сумму весовых коэффициентов предлагается считать равной единице. После ввода исходных параметров функционирования каждого элемента назначается одинаковое для всех элементов ОТС усредненное значение весового коэффициента, соответствующее случаю, когда все элементы в ОТС выполняют одинаковый объем работ. Далее вычисляется значение показателя целевой функции ОТС при одинаковом для всех элементов усредненном значении весовых коэффициентов. После этого вычисляются значения показателя целевой функции ОТС поочередно без каждого из своих элементов. Нормированная величина разницы между этим значением целевой функции ОТС с исключением некоторого элемента и ее значением, рассчитанным с усредненным коэффициентом, является весом исключенного элемента. То есть в методе полагается, что именно отсутствие эффекта от функционирования исключенного элемента наносит урон ОТС, в состав которой этот элемент входит.

Ввиду такого содержания рассматриваемый метод предлагается назвать «методом последовательных исключений». С алгоритмической точки зрения он состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Устанавливают для весовых коэффициентов элементов ОТС единое усредненное значение. То есть полагается, что изначально все элементы ОТС равнозначны. Поскольку сумма весовых коэффициентов элементов ОТС равна 1, то значение одинакового для всех элементов усредненного весового коэффициента рассчитывается по формуле:

$$w = 1 / S, \tag{1}$$

где S – количество элементов ОТС.

Шаг 2. Вычисляют значение целевой функции ОТС f_0 с одинаковым для всех элементов усредненным весовым коэффициентом.

Шаг 3. Вычисляют значения целевой функции ОТС без каждого элемента поочередно. Кортеж полученных значений целевой функции ОТС имеет вид: $F = <f_1 \ldots f_s \ldots f_S>$, где f_s – значение показателя целевой функции при исключенном s-м элементе. В случае исключения одного элемента система должна выполнить тот же объем работы, что и без его исключения. Поэтому работа исключенного элемента возлагается на оставшиеся элементы системы. Это математически выражается перераспределением значения весового коэффициента исключаемого элемента по весовым коэффициентам остальных элементов. Необходимость перераспределения можно доказать на примере двух конкурирующих одинаковых ОТС, в одну из которых дополнительно добавляется уникальный элемент. Для таких исходных данных исключение дополнительного элемента без перераспределения приведет к ситуации, когда две одинаковые ОТС будут выполнять разный совокупный объем работ, что противоречит логике.

Значение перераспределенного одинакового для всех оставшихся элементов ОТС усредненного весового коэффициента вычисляется по формуле:

$$w^* = 1 / (S - 1). \tag{2}$$

При необходимости в модели также производят перенормировку весовых коэффициентов в группах, подгруппах и т.п., предусматриваемых целевой функцией ОТС.

Шаг 4. Вычисляют кортеж реальных весовых коэффициентов элементов ОТС W следующим образом:

$$w_s = \frac{f_0 - f_s}{\sum_{k=1}^{S} (f_0 - f_k)}. \tag{3}$$

Полученные с использованием формулы (3) весовые коэффициенты w_s могут иметь положительные, нулевые или отрицательные значения. Отрицательные значения весовых коэффициентов могут быть у тех элементов, которые наносят урон своей ОТС (например, такое может быть в военных ОТС, когда некоторые силы и средства ведут т.н. «дружественный огонь» по своим силам и средствам вследствие дезинформации).

Метод последовательных исключений предполагает также вариант исключения нескольких элементов из ОТС. В таком случае урон ОТС от их ис-

ключения будет соответствовать весу совокупности исключенных элементов. Однако, одновременное исключение нескольких элементов целесообразно в том случае, когда существование такой самостоятельной совокупности элементов предусматривает целевая функция ОТС. При этом следует учитывать, что суммарный урон от исключения двух и т.д. элементов по отдельности меньше урона от их одновременного исключения по причине возникновения т.н. «синергетического» эффекта в ОТС.

Пример аналитической модели организационно-технической системы

В качестве примера модели ОТС, учитывающей эффекты от применения ее элементов на уровне целевой функции, предлагается комплексная аналитическая модель общевойскового боя. Модель предназначена для прогнозирования эффективности сил и средств, осуществляющих огневое поражение и ведущих разведку и радиоэлектронную борьбу (РЭБ). Актуальность этой задачи в настоящей работе обосновывать не будем. Это достаточно подробно сделано в работе [13], где предложена модель, решающая такую задачу на теоретико-множественной стадии детализации, в то время как предлагаемая комплексная аналитическая модель в основном ориентирована на причинно-следственную стадию детализации исследуемого процесса.

Следует отметить, что в зависимости от глубины понимания любой анализируемый процесс может быть представлен на одной из следующих стадий детализации (от наименьшей глубины к наибольшей) [14]:

1) *теоретико-множественная стадия* (описание явлений, событий и отношений между ними);
2) *логико-вероятностная стадия* (операции с вероятностями наступления событий);
3) *причинно-следственная стадия* (операции с состояниями процесса во времени);
4) *автоматно-агрегатная стадия* (операции с отдельными или агрегированными дискретными устройствами, в каждый момент времени находящимися в одном из множества состоянии);
5) *программная стадия* (операции с алгоритмами процесса).

Пользуясь этой классификаций, далее в статье будет сделан акцент на стадиях детализации различных исследуемых процессов в предлагаемой комплексной аналитической модели общевойскового боя. По мнению авторов, это поможет читателю легче разобраться с уже достигнутыми стадиями детализации существующих аналитических моделей общевойскового боя и в перспективе будет способствовать научной проработке еще недостаточно изученных закономерностей боя.

В предлагаемой модели весовые коэффициенты используются применительно к элементам боевых порядков тактических воинских формирований. Модель реализована в виде программного комплекса, схожего по своей сути с элементом программного обеспечения типа «Блицкриг», которое используется в автоматизированной системе управления войсками США FBCB2 [15, 16]. Для

демонстрации возможности учета разнородных факторов и процессов, оказывающих влияние на целевую функцию ОТС, рассмотрим основные положения этой комплексной модели.

Описание комплексной аналитической модели общевойскового боя

Схема реализации комплексной модели предусматривает пять уровней декомпозиции процесса общевойскового боя. На первом уровне на электронную карту местности наносится тактическая обстановка. На втором уровне каждый элемент боевого порядка декомпозируется до средств и/или людей, которые могут быть связаны потоками информации. Каждое средство на третьем уровне декомпозиции представляется в виде совокупности устройств (например, автомобилей, орудий) и/или информационно-технических средств (ИТС). Под ИТС понимаются радиоэлектронные средства, средства вычислительной техники или их комбинация друг с другом или с техническими средствами других классов. Устройства, ИТС и люди могут быть связаны потоками информации, организуемыми различными способами (в том числе вербально между людьми). На четвертом уровне каждое устройство представляется в виде частных процессов под управлением процесса-диспетчера, реализованного с использованием модели системы массового обслуживания с отказами. На пятом уровне каждый частный процесс представляется в виде дискретно-событийной полумарковской модели.

Комплексная аналитическая модель рассматривает конфликт сторон, в котором действие одной стороны сопровождается противодействием с другой стороны. Модель учитывает взаимное влияние элементов боевых порядков противоборствующих воинских формирований с семью следующими функциями:

- элемент с функцией управления (пример: командно-наблюдательный пункт, далее – *элемент У*);
- элемент с функцией разведки (пример: средство технической разведки, далее – *элемент Р*);
- элемент с функцией огневого поражения (пример: танк, гранатомет, гаубица, далее – *элемент ОП*);
- элемент с функцией радиоэлектронного подавления (РЭП) (пример: средство радиоэлектронного подавления связи, далее – *элемент РЭП*);
- элемент с функцией поражения электромагнитным излучением (пример: радиочастотное оружие, далее – *элемент ЭМИ*);
- элемент с функцией программного воздействия (пример: интеллектуальный блокиратор сотовой связи, далее – *элемент ПВ*);
- элемент с функцией связи (примеры: подвижный узел связи, далее – *элемент С*).

Один элемент может выполнять несколько указанных функций.

Система показателей комплексной аналитической модели общевойскового боя

Иерархическая система используемых в модели показателей включает следующие группы:

- *боевые показатели*. Наивысшим по иерархии показателем модели является показатель «выигрыш в соотношении сил». Этот показатель рассчитывается с использованием метода динамики средних с использованием аналитических выражений, приведенных в [17, 18]. Группа боевых показателей рассматривает процесс вооруженного противоборства на *причинно-следственной стадии* детализации. Однако модель может быть перестроена и на другой подход к оценке боевого показателя, поскольку, в первую очередь, ориентирована на получение для противоборствующих формирований значений частных боевых показателей «эффективность управления» и «численность» формирований;
- *сетевые показатели* характеризуют конфиденциальность, целостность и доступность информации в управляющей, исполнительной, разведывательной и нештатной сетях формирований и рассматриваются на *логико-вероятностной стадии* детализации. Методика вычисления значений этих показателей приведена в [18]. Сети воинского формирования образуют элементы его боевого порядка с соответствующими одинаковыми функциями. Нештатную сеть формирования образуют элементы с нештатными ИТС (например, сотовый телефон, ноутбук с Wi-Fi-адаптером). Весовые коэффициенты элементов боевого порядка воинских формирований в комплексной модели учитываются при расчете значений показателей именно в этой группе. Так, например, для разведывательной сети показатель доступности информации определяется как взвешенная сумма значений показателей доступности информации всех элементов формирования с функцией разведки;
- *элементные показатели* рассматриваются на *логико-вероятностной стадии* детализации и характеризуют физическую и информационную защищенность отдельных элементов формирований. Их значения вычисляются с использованием аналитических выражений, изложенных в [19]. *Элементные* и *сетевые показатели* в совокупности можно называть *информационно-боевыми показателями*;
- *информационные показатели* на базе комбинирования *причинно-следственной* и *логико-вероятностной стадий* детализации характеризуют физическую и информационную защищенность отдельных устройств и ИТС в элементах. Они рассчитываются с использованием способа стратифицированного аналитического описания процесса функционирования ИТС, изложенного в [19], и способа аналитического моделирования процесса распространения вирусов в компьютерных сетях различной структуры, приведенного в [20];
- *организационные показатели* (далее обозначаются как *ОРГ*) на *логико-вероятностной стадии* детализации (для не задаваемых показателей)

характеризуют расположение в пространстве сил и средств формирований и среднестатистические временные интервалы их применения;
- *тактико-технические показатели* (далее обозначаются как *ТТХ*) характеризуют возможности средств огневого поражения, РЭБ и разведки, применяемых тактическими воинскими формированиями.

Тактико-технические и подавляющее большинство организационных показателей являются задаваемыми. В предлагаемой комплексной модели производятся вычисления по принципу «снизу вверх»: значения показателей низших групп используются в расчете значений показателей высших групп.

Комплексная модель включает совокупность частных взаимосвязанных аналитических моделей функционирования различных элементов. В качестве примера рассмотрим частную модель совместного применения элементов с функциями разведки и огневого поражения. Демонстрация этой частной модели позволяет увидеть наиболее общий процесс конфликта элементов в вооруженном противоборстве, поскольку передача информации от *элемента Р элементу ОП* возможна напрямую, через промежуточные элементы, а также непосредственно в элементе, если он комбинирует функции разведки и огневого поражения. Частные модели *элементов РЭП, ЭМИ* и *ПВ* могут быть получены из этой частной модели, поскольку такие элементы имеют функцию разведки и в процессе боевого применения в наиболее общем случае могут обойтись без внешнего целеуказания.

Частная аналитическая модель совместного применения элементов с функциями разведки и огневого поражения

В процессе применения *элемент Р* формирования *А*(*Б*) (здесь и далее выражение *А*(*Б*) означает: формирование *А* или формирование *Б*) осуществляет разведку в заданном районе и передает разведданные о целевом элементе формирования *Б*(*А*) одному или нескольким *элементам ОП* своего формирования. Эти *элементы ОП*, в свою очередь, осуществляют поражение целевого элемента формирования *Б*(*А*).

Процесс применения рассматриваемых элементов (элемента) формирования *А*(*Б*) осуществляется в условиях следующих деструктивных воздействий со стороны элементов формирования *Б*(*А*):
- *элементы ПВ* осуществляют воздействие на программное обеспечение внутреннего управления рассматриваемых элементов, каналы навигации, каналы связи, а также на ИТС промежуточных элементов;
- *элементы РЭП* воздействуют на каналы разведки элемента с функцией разведки (осуществляют постановку классических радиопомех и имитацию радиоэлектронной обстановки), каналы навигации рассматриваемых элементов, а также на их каналы связи и ИТС промежуточных элементов;
- *элементы ОП* воздействуют на техническое обеспечение рассматриваемых и промежуточных элементов;
- *элементы Р* осуществляют разведку местоположения и каналов связи рассматриваемых и промежуточных элементов;

- *элементы ЭМИ* осуществляют комплексное воздействие на электронную элементную базу рассматриваемых и промежуточных элементов.

Каждый элемент формирования *Б*(*А*), противодействующий рассматриваемым элементам формирования *А*(*Б*), характеризуется собственными временами перемещения из предыдущих в требуемые пункты дислокации, развертывания, подготовки к работе и реализации своих воздействий.

Рассматриваемая частная модель обеспечивает вычисление показателя «время до огневого поражения» *i*-го элемента формирования *Б*(*А*), на который воздействуют элементы формирования *А*(*Б*). Этот показатель относится к группе информационных показателей, поскольку зависит от особенностей организации боя, и необходим для определения частных боевых показателей «эффективность управления» и «численность» с использованием выражений, изложенных в [18]. Он учитывается в элементном показателе «вероятность уничтожения» *i*-го элемента противником, который предлагается рассчитывать с учетом возможностей *элементов Р* и *ОП* по формуле:

$$\forall h \in \overline{1,H};\ \forall f \in \overline{1,U_{ОП}^{А(Б)}};\ \forall n \in \overline{1,U_{P}^{А(Б)}};\ \forall i \in \overline{1,N_{\Sigma}^{А(Б)}};\ \forall j \in \overline{1,N_{*_i}^{А(Б)}}$$

$$\psi_{*_i}^{Б(А)}(t) = \left(\mu_{*_i}^{А(Б)} + \max_{\{h\}} P_{Pобн_n}^{А(Б)}(h) - \mu_{*_i}^{А(Б)} \cdot \max_{\{h\}} P_{Pобн_n}^{А(Б)}(h)\right) \times$$

$$\times \max_{\{f\}} P_{ОП\,уничт_{f,i}}^{А(Б)}(d) \cdot \min_{\{j\}} P_{*_{i,j}}^{А(Б)}(t) \qquad (4)$$

где: *H* – количество используемых в модели физических полей, в которых ведется разведка, задается, *ОРГ*; $U_{ОП}^{А(Б)}$ и $U_{P}^{А(Б)}$ – количество *элементов ОП* и *Р* формирования *А*(*Б*), задается, *ОРГ*; $N_{\Sigma}^{А(Б)}$ – количество элементов в формировании *А*(*Б*), задается, *ОРГ*; $N_{*_i}^{А(Б)}$ – количество ИТС в некотором *i*-м элементе формировании *А*(*Б*) (здесь и далее в обозначениях, если не оговорено иное, знак * обозначает тип элемента: *Р*, *ОП*, *ЭМИ*, *ПВ*, *РЭП*, *У* или *С*, а знаки ~ или # обозначают букву, соответствующую порядковому номеру), задается, *ОРГ*; $\mu_{*_i}^{А(Б)}$ – вероятность разведки *i*-го элемента нетехническими средствами (например, войсковой разведкой, является задаваемым организационным показателем), задается, *ОРГ*; $P_{ОП\,уничт_{f,i}}^{А(Б)}(d)$ – вероятность безусловного уничтожения *i*-го элемента *f*-м *элементом ОП* на расстоянии *d* (км); $P_{*_{i,j}}^{А(Б)}(t)$ – вероятность возникновения условий для нахождения *j*-го ИТС *i*-го элемента в состоянии «уничтожен»; $P_{Pобн_n}^{А(Б)}(h)$ – вероятность обнаружения (идентификации) цели, обеспечиваемая *n*-м *элементом Р* в *h*-м физическом поле, если у этого элемента есть связь с *f*-м *элементом ОП*, задается, *ТТХ*.

Итак, в формуле (4) для расчета значения показателя $P_{*_{i,j}}^{А(Б)}(t)$ используется полумарковская модель, изложенная в [19]. Показатель «время до огневого поражения» *i*-го элемента формирования *Б*(*А*) в этой модели является ключевым компонентом исходных данных и зависит от конкретных условий тактической и радиоэлектронной обстановки, в которых находится элемент. Продолжительность этого времени при допущении, что при огневом поражении любого элемента все ИТС и устройства этого элемента поражаются в одинаковой мере, и

при вскрытии средствами разведки хотя бы одного ИТС элемента вскрывается весь элемент, предлагается вычислять следующим образом:

$$T_{*_i}^{Б(А)} = \begin{cases} \min\limits_{\{f\}}\left(\max\limits_{\{f\},\{n\}}\left(T_{ОП\,пер_f}^{А(Б)} + T_{ОП\,разв_f}^{А(Б)}, \phi^{А(Б)}(f,n), T_{Р\,пер_n}^{А(Б)} + T_{Р\,разв_n}^{А(Б)} + T_{Р\,рез_n}^{А(Б)}\right) + \right. \\ \qquad \left. + T_{ОП\,эфф_f}^{А(Б)} \cdot \eta_{ОП_f}^{А(Б)}\right), \\ \quad \text{если } \left(u_{*\,замет_i}^{А(Б)}(h) - u_{*\,маск_i}^{Б(А)}(h) \geq u_{Р\,дал_n}^{А(Б)}(d,h)\right) \wedge \left(K_{*_i}^{Б(А)} \in Э_{ОП_f}^{А(Б)}\right) \\ \quad \text{при } \eta_{ОП_f}^{А(Б)} = \begin{cases} \infty, \text{ если } U_{*\,доп_i}^{Б(А)} + U_{*\,баз_i}^{Б(А)} \geq u_{ОП\,дал_f}^{А(Б)}(d); \\ 1 \text{ в противном случае;} \end{cases} \\ \infty \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (5)$$

где: $T_{*\,пер_\#}^{А(Б)}$ – время передвижения из предыдущего в требуемый пункт дислокации некоторого элемента, задается, *ОРГ* (с); $T_{*\,разв_\#}^{А(Б)}$ – время развертывания и подготовки к боевой работе некоторого элемента, задается, *ТТХ* (с); $T_{*\,рез_\#}^{А(Б)}$ – время получения результатов разведки некоторым *элементом Р*, *ЭМИ*, *ПВ* или *РЭП*, под которым понимается временной интервал с начала боевой работы этого элемента до передачи результатов разведки заинтересованным элементам своего формирования (для *элементов Р*) или подсистеме реализации воздействия своего элемента (для *элементов ЭМИ*, *ПВ*, *РЭП*), задается, *ТТХ* (с); $T_{*\,эфф_\#}^{А(Б)}$ – время достижения эффекта от применения некоторого элемента, задается, *ТТХ* (с); $U_{*\,баз_i}^{Б(А)}$ – уровень базовой защищенности *i*-го элемента от огневого поражения, под которым понимается эквивалент брони, достигаемый с применением штатных методов защиты, задается, *ТТХ* (мм); $U_{*\,доп_i}^{Б(А)}$ – уровень дополнительной защищенности *i*-го элемента от огневого поражения, достигаемый с применением инженерных методов защиты, задается, *ОРГ* (мм); $u_{ОП\,дал_\#}^{А(Б)}(d)$ – дальностная характеристика применения некоторого *элемента ОП*, определяющая эквивалент брони, который способен пробить этот элемент на расстоянии *d* (км) между этим элементом и поражаемым объектом, задается, *ТТХ* (мм); $u_{Р\,дал_\#}^{А(Б)}(d,h)$ – дальностная характеристика применения некоторого *элемента Р*, определяющая излучательные и/или отражательные свойства цели, определяемые им на расстоянии *d* (км) для вида заметности *h* (например, эффективная площадь рассеяния (м^2)), задается, *ТТХ*; $u_{*\,замет_i}^{Б(А)}(h)$ – уровень заметности *i*-го элемента, характеризующий излучательные и (или) отражательные свойства этого элемента по виду заметности *h* (например, радиолокационная (м^2)), достигаемые с применением штатных средств снижения заметности, задается, *ТТХ*; $u_{*\,маск_i}^{Б(А)}(h)$ – уровень маскировки *i*-го элемента, характеризующий излучательные и (или) отражательные свойства этого элемента по виду заметности *h* за счет применения нештатных средств снижения заметности (например, растительная маскировка (м^2)), задается, *ОРГ*; $K_{*_\#}^{Б(А)}$ – координаты некоторого элемента, задается, *ОРГ*; $Э_{*_\#}^{А(Б)}$ – множество координат в пределах границ азимутального и угломестного секторов некоторого элемента, задается, *ОРГ*; $\phi^{А(Б)}(f,n)$ – коэффициент противо-

действия выполнению цикла «увидел-поразил» *n*-м *средством Р* и *f*-м *средством ОП* формирования *А*(*Б*).

Коэффициент $\phi^{А(Б)}(f, n)$ в (5) учитывает влияние формирования *Б*(*А*) на все элементы формирования *А*(*Б*), задействованные в цикле «разведал – поразил». Возможны три варианта реализации этого цикла, когда функции разведки и огневого поражения выполняются:

1) одним комбинированным *элементом Р* и *ОП*;
2) *элементами Р* и *ОП*, связанными напрямую;
3) *элементами Р* и *ОП*, связанными через один или несколько элементов.

Во всех вариантах полагается, что элементы обеспечены высокоскоростными каналами связи и время передачи сообщений по ним стремится к нулю.

Для первого варианта коэффициент $\phi^{А(Б)}(f,n) = \infty$, если $\exists h \in \overline{1,H}$; $\exists g \in \overline{1,U_{ОП}^{Б(А)}}$; $\exists m \in \overline{1,U_{РЭП}^{Б(А)}}$; $\exists v \in \overline{1,U_{ЭМИ}^{Б(А)}}$; $\exists b \in \overline{1,U_{ПВ}^{Б(А)}}$; $\exists z \in \overline{1,U_{Р}^{Б(А)}}$; $\forall q \in \overline{1,U_{Р\,беспр_{\#}}^{А(Б)}}$:

$$\min_{\{n\}}\left(T_{Р\,пер_n}^{А(Б)} + T_{Р\,разв_n}^{А(Б)} + T_{Р\,эфф_n}^{А(Б)}\right) \geq \min\begin{pmatrix} T_{ОП}(g,z), \text{если } \xi(n,z) \wedge \alpha(n,g), \\ T_{РЭП}(m), \text{если } \xi(n,m) \wedge \beta(n,m), \\ T_{ЭМИ}(v), \text{если } \xi(n,v) \wedge \gamma(n,v), \\ T_{ПВ}(b), \text{если } \xi(n,b) \wedge \delta(n,b), \\ \infty \text{ в противном случае} \end{pmatrix} \text{ при}$$

$$T_{ОП}(g,z) = \min_{\{g\}}\left(\max_{\{g\},\{z\}}\left(T_{ОП\,пер_g}^{Б(А)} + T_{ОП\,разв_g}^{Б(А)}, T_{Р\,пер_z}^{Б(А)} + T_{Р\,разв_z}^{Б(А)} + T_{Р\,рез_z}^{Б(А)}\right) + T_{ОП\,эфф_g}^{Б(А)}\right);$$

$$T_{РЭП}(m) = \min_{\{m\}}\left(T_{РЭП\,пер_m}^{Б(А)} + T_{РЭП\,разв_m}^{Б(А)} + T_{РЭП\,рез_m}^{Б(А)} + T_{РЭП\,эфф_m}^{Б(А)}\right);$$

$$T_{ЭМИ}(v) = \min_{\{v\}}\left(T_{ЭМИ\,пер_v}^{Б(А)} + T_{ЭМИ\,разв_v}^{Б(А)} + T_{ЭМИ\,рез_v}^{Б(А)} + T_{ЭМИ\,эфф_v}^{Б(А)}\right);$$

$$T_{ПВ}(b) = \min_{\{b\}}\left(T_{ПВ\,пер_b}^{Б(А)} + T_{ПВ\,разв_b}^{Б(А)} + T_{ПВ\,рез_b}^{Б(А)} + T_{ПВ\,физ_b}^{Б(А)} + T_{ПВ\,техн_b}^{Б(А)} + \min\left(T_{ПВ\,сет_b}^{Б(А)}, T_{ПВ\,кан_b}^{Б(А)}\right)\right);$$

$$\xi(\#,\sim) = \left(K_{P_{\#}}^{А(Б)} \in Э_{P_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(u_{Р\,замет_{\#}}^{А(Б)}(h) - u_{Р\,маск_{\#}}^{А(Б)}(h) \leq \min_{\{\sim\}}\left(u_{Р\,дал_{\sim}}^{Б(А)}(d,h)\right)\right);$$

$$\alpha(\#,\sim) = \left(K_{P_{\#}}^{А(Б)} \in Э_{ОП_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(U_{Р\,доп_{\#}}^{А(Б)} + U_{Р\,баз_{\#}}^{А(Б)} \leq \max_{\{\sim\}}\left(u_{ОП\,дал_{\sim}}^{Б(А)}(d)\right)\right);$$

$$\gamma(\#,\sim) = \left(K_{P_{\#}}^{А(Б)} \in Э_{ЭМИ_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(U_{Р\,завис_{\#}}^{А(Б)} \leq \max_{\{\sim\}}\left(u_{ЭМИ\,дал_{\sim}}^{Б(А)}(d)\right)\right);$$

$$\beta(\#,\sim) = \left(K_{P_{\#}}^{А(Б)} \in Э_{РЭП_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(\left(u_{Р\,п/с_{\#}}^{А(Б)}(q) \leq \max_{\{\sim\},\{q\}}\left(u_{РЭП\,дал_{\sim}}^{Б(А)}(d,q)\right)\right) \wedge \right.$$

$$\left. \wedge \left(\left(U_{Р\,развИТС_{\#}}^{А(Б)} \subseteq U_{РЭП\,достИТС_{\sim}}^{Б(А)}\right) \vee \left(\left(U_{Р\,нав_{\#}}^{А(Б)} \subseteq U_{РЭП\,достИТС_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(U_{Р\,нав_{\#}}^{А(Б)} \neq \varnothing\right)\right)\right)\right);$$

$$\delta(\#,\sim) = \left(K_{P_{\#}}^{А(Б)} \in Э_{ПВ_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(\left(u_{Р\,с/ш_{\#}}^{А(Б)}(q) \leq \max_{\{\sim\},\{q\}}\left(u_{ПВ\,дал_{\sim}}^{Б(А)}(d,q)\right)\right) \wedge \right.$$

$$\left. \wedge \left(\left(\left(U_{Р\,нав_{\#}}^{А(Б)} \subseteq U_{ПВ\,достИТС_{\sim}}^{Б(А)}\right) \wedge \left(U_{Р\,нав_{\#}}^{А(Б)} \neq \varnothing\right)\right) \vee \left(U_{Р\,беспр_{\#}}^{А(Б)} \subseteq U_{ПВ\,достИТС_{\sim}}^{Б(А)}\right)\right)\right), \quad (6)$$

где: $U_{РЭП}^{Б(А)}$, $U_{ЭМИ}^{Б(А)}$ и $U_{ПВ}^{Б(А)}$ – количество *элементов РЭП*, *ЭМИ* и *ПВ* в формировании *Б*(*А*), соответственно, задается, *ОРГ*; $T_{ПВ\,физ_{\#}}^{Б(А)}$ – время получения физического доступа *элемента ПВ* к ИТС целевого для него элемента (т.е. время на обеспечение электромагнитной доступности), задается, *ТТХ* (с); $T_{ПВ\,техн_{\#}}^{Б(А)}$ – время полу-

чения технического доступа *элемента ПВ* к ИТС целевого для него элемента (т.е. время на подбор параметров радиосигналов), задается, *ТТХ* (с); $T^{Б(А)}_{ПВ\,сет_{\#}}$ – время до начала скрытого нарушения *элементом ПВ* доступности информации ИТС целевого для него элемента на сетевом и вышестоящих уровнях OSI), задается, *ТТХ* (с); $T^{Б(А)}_{ПВ\,кан_{\#}}$ – время до начала скрытого нарушения *элементом ПВ* доступности информации ИТС целевого для него элемента на канальном уровне OSI), задается, *ТТХ* (с); $U^{А(Б)}_{*беспр_{\#}}$ – номенклатура ИТС для беспроводной связи в некотором элементе, задается, *ОРГ*; $u^{А(Б)}_{*п/с_{\#}}(q)$ – пороговый уровень помеха/сигнал для нарушения работы q-го ИТС, обеспечивающего беспроводной связью некоторый элемент, задается, *ТТХ* (дБ); $u^{Б(А)}_{РЭП\,дал_{\#}}(d,q)$ – дальностная характеристика применения некоторого *элемента РЭП*, характеризующая его способность нарушить работу q-го ИТС, обеспечивающего беспроводной связью некоторый целевой элемент, путем достижения или превышения порогового уровня сигнал/шум на входе приемника этого ИТС на расстоянии d (км), рассчитывается с учетом энергопотенциалов, чувствительностей и высот *элемента РЭП* и q-го ИТС, а также дистанции подавления и дистанций связи q-го ИТС с другими ИТС; $u^{Б(А)}_{ЭМИ\,дал_{\#}}(d)$ – дальностная характеристика применения некоторого *элемента ЭМИ*, характеризующая плотность потока энергии электромагнитного поля, формируемого этим элементом на расстоянии d (км), рассчитывается с учетом энергопотенциала и высоты *элемента ЭМИ* (Вт/см^2); $U^{А(Б)}_{Р\,развИТС_{\#}}$ – номенклатура разведывательных ИТС некоторого *элемента Р*, задается, *ТТХ*; $U^{Б(А)}_{*достИТС_{\#}}$ – номенклатура ИТС, доступных для некоторого *элемента РЭП* или *ПВ*, задается, *ТТХ*; $U^{А(Б)}_{*нав_{\#}}$ – номенклатура ИТС некоторого элемента для получения внешней навигационной информации, без которой этот элемент неработоспособен, задается, *ТТХ*; $u^{А(Б)}_{*с/ш_{\#}}(q)$ – минимальный уровень приема сигнала q-м ИТС, обеспечивающим беспроводной связью некоторый элемент, задается, *ТТХ* (дБ); $U^{А(Б)}_{*завис_{\#}}$ – пороговая плотность потока энергии электромагнитного поля формируемая *элементами ЭМИ*, достаточная для зависания ИТС некоторого элемента, задается, *ТТХ* (Вт/см^2); $u^{Б(А)}_{ПВ\,дал_{\sim}}(d,q)$ – дальностная характеристика применения некоторого *элемента ПВ*, характеризующая его способность установить информационное взаимодействие с q-м ИТС, обеспечивающим беспроводной связью и/или навигационной информацией некоторый целевой элемент, на уровне чувствительности приемника этого ИТС на расстоянии d (км), рассчитывается с учетом энергопотенциалов, чувствительностей и высот *элемента ПВ* и q-го ИТС, а также дистанции воздействия на q-й ИТС.

При невыполнении условия (6) коэффициент $\phi^{А(Б)}(f,n)=0$ для первого варианта реализации цикла «разведал – поразил».

Для второго варианта этого цикла $\phi^{А(Б)}(f,n)=\infty$, если:

$$\max\left(\min_{\{n\}}\left(T^{А(Б)}_{Р\,пер_n}+T^{А(Б)}_{Р\,разв_n}+T^{А(Б)}_{Р\,эфф_n}\right),\min_{\{f\}}\left(T^{А(Б)}_{ОП\,пер_f}+T^{А(Б)}_{ОП\,разв_f}+T^{А(Б)}_{ОП\,эфф_f}\right)\right)\geq$$

$$\geq \min \begin{pmatrix} T_{ОП}(g,z), \text{если } \left(\xi(n,z)\wedge\alpha(n,g)\right)\vee\left(\xi(f,z)\wedge\alpha(f,g)\right), \\ T_{РЭП}(m), \text{ если } \left(\xi(n,m)\wedge\beta(n,m)\right)\vee\left(\xi(f,m)\wedge\beta(f,m)\right), \\ T_{ЭМИ}(v), \text{ если } \left(\xi(n,v)\wedge\gamma(n,v)\right)\vee\left(\xi(f,v)\wedge\gamma(f,v)\right), \\ T_{ПВ}(b), \text{ если } \left(\xi(n,b)\wedge\delta(n,b)\right)\vee\left(\xi(f,b)\wedge\delta(f,b)\right), \\ \infty \text{ в противном случае} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При невыполнении условия (7) коэффициент $\phi^{А(Б)}(f,n)=0$ для второго варианта реализации цикла «разведал – поразил».

Для третьего варианта $\phi^{А(Б)}(f,n)=\infty$, если:

$$\max \begin{pmatrix} \min\limits_{\{n\}}\left(T^{А(Б)}_{Р\text{пер}_n}+T^{А(Б)}_{Р\text{разв}_n}+T^{А(Б)}_{Р\text{эфф}_n}\right), \\ \min\limits_{\{f\}}\left(T^{А(Б)}_{ОП\text{пер}_f}+T^{А(Б)}_{ОП\text{разв}_f}+T^{А(Б)}_{ОП\text{эфф}_f}\right), \\ \max\left(\min\limits_{\{s\}}\left(T^{А(Б)}_{*\text{пер}_s}+T^{А(Б)}_{*\text{разв}_s}+T^{А(Б)}_{*\text{эфф}_s}\right)\right) \end{pmatrix} \geq$$

$$\geq \min \begin{pmatrix} T_{ОП}(g,z), \text{если } \left(\xi(n,z)\wedge\alpha(n,g)\right)\vee \\ \qquad \vee\left(\xi(f,z)\wedge\alpha(f,g)\right)\vee\left(\bigvee\limits_{\{s\}}\left(\xi_s(s,z)\wedge\alpha_s(s,g)\right)\right), \\ T_{РЭП}(m), \text{если } \left(\xi(n,m)\wedge\beta(n,m)\right)\vee \\ \qquad \vee\left(\xi(f,m)\wedge\beta(f,m)\right)\vee\left(\bigvee\limits_{\{s\}}\left(\xi_s(s,m)\wedge\beta_s(s,m)\right)\right), \\ T_{ЭМИ}(v), \text{если } \left(\xi(n,v)\wedge\gamma(n,v)\right)\vee \\ \qquad \vee\left(\xi(f,v)\wedge\gamma(f,v)\right)\vee\left(\bigvee\limits_{\{s\}}\left(\xi_s(s,v)\wedge\gamma_s(s,v)\right)\right), \\ T_{ПВ}(b), \text{если } \left(\xi(n,b)\wedge\delta(n,b)\right)\vee \\ \qquad \vee\left(\xi(f,b)\wedge\delta(f,b)\right)\vee\left(\bigvee\limits_{\{s\}}\left(\xi_s(s,b)\wedge\delta_s(s,b)\right)\right), \\ \infty \text{ в противном случае} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\{s\}$ – множество промежуточных элементов, обеспечивающих передачу разведданных от *n*-го *элемента Р f*-му *элементу ОП* формирования А(Б).

При невыполнении условия (8) коэффициент $\phi^{А(Б)}(f,n)=0$ для третьего варианта реализации цикла «разведал – поразил».

Формулы (5)–(8) имеют следующий физический смысл. Время до огневого поражения каждого элемента формирования (назовем его целевым элементом) есть минимальное время, за которое хотя бы одна пара связанных друг с другом элементов с функцией разведки и огневого поражения (или один элемент с функциями разведки и огневого поражения) противника переместится в требуемую точку на поле боя, развернется, подготовится к работе, произведет разведку и нанесет удар по целевому элементу. При этом элемент противника с функцией разведки должен в заданных метеоусловиях заметить целевой элемент, и элемент с функцией огневого поражения противника должен попасть в

этот целевой элемент в условиях противодействия со стороны формирования целевого элемента.

Далее рассмотрим способ вычисления значения показателя «вероятность безусловного уничтожения» i-го элемента f-м *элементом ОП* в формуле (4).

В вышеизложенной частной математической модели используется следующий алгоритм целераспределения *элементов ОП*. Для каждого f-го *элемента ОП* формируется вектор целей, представляющий собой кортеж длины I: $< C^{А(Б)}_{ОП_{f,1}} \ldots C^{А(Б)}_{ОП_{f,i}} \ldots C^{А(Б)}_{ОП_{f,I}} >$. Правила наполнения вектора целей:

- вектор *элемента ОП* содержит только те цели, которые разведаны и доступны для этого элемента;
- первой в кортеже является самая важная цель, I-я позиция у наименее важной цели;
- цели в векторе упорядочиваются согласно следующему отношению предпочтения: «разведка $\succ$ управление $\succ$ РЭБ $\succ$ огневое поражение» (пояснение такого отношения приведено в следующем разделе статьи);
- цели одинакового типа упорядочиваются по дальности.

Элемент ОП поражает цели из сформированного для него вектора целей по порядку, начиная с первой. Поражение завершается либо на последней цели в векторе, либо на очередной цели в случае окончания боеприпасов. Для каждого *элемента ОП* на моделируемый период боя задается количество боеприпасов k_f, задается, *ОРГ*. Количество попаданий в i-й элемент, необходимых для его уничтожения, рассчитывается на основе классической формулы:

$$A(d_i) = \left\lceil \log_{\left(1-P^{А(Б)}_{ОП\,попад_f}(d_i)\right)} (1-L_i) \right\rceil, \tag{9}$$

где: L_i – пороговый уровень ущерба, при котором i-й элемент считается уничтоженным и производится перенацеливание на очередную цель, задается, ОРГ, часто $L_i \in [0{,}7 \ldots 0{,}9]$); $P^{А(Б)}_{ОП\,попад_f}(d_i)$ – вероятность попадания в i-й элемент одним боеприпасом f-го *элемента ОП* на расстоянии d_i (км) (например, для автомата по ростовой фигуре на дальности 0,1 км она может быть равна 0,8); $\lceil x \rceil$ – функция наименьшего целого, большего или равного значению аргумента x.

С учетом этого показатель «вероятность безусловного уничтожения» i-го элемента f-м *элементом ОП* в формуле (4) предлагается рассчитывать с использованием следующей формулы:

$$P^{А(Б)}_{ОП\,уничт_{f,i}}(d_i) = \begin{cases} 1-\left(1-P^{А(Б)}_{ОП\,попад_f}(d_i)\right)^{A(d_i)} \text{ при } A(d_i) \le k_f - \sum\limits_{j=1}^{i} A(d_j), \\ 1-\left(1-P^{А(Б)}_{ОП\,попад_f}(d_i)\right)^{k_f - \sum\limits_{j=1}^{i} A(d_j)} \text{ в противном случае.} \end{cases} \tag{10}$$

С использованием приведенной комплексной аналитической модели представляется возможным оценивать изменения во времени соотношения сил до первой смены позиции любым элементом этих формирований. После смены позиции вышеуказанная система показателей рассчитывается снова.

Результаты моделирования

Рассмотрим применение предложенного метода последовательных исключений на простейшем примере гипотетического боя двух мотострелковых (мотопехотных) рот, занявших позиционную оборону на расстоянии до 5 км друг от друга (рис. 1).

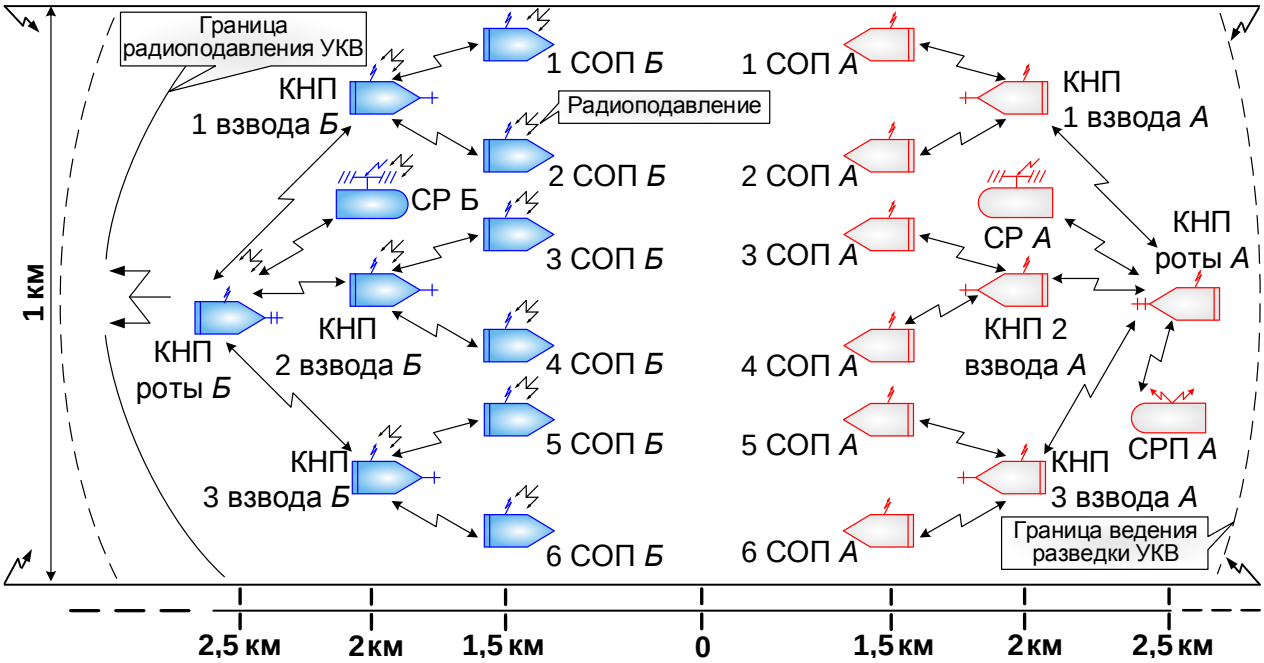

Рис. 1. Боевые порядки рот (вариант)

Полный набор исходных параметров комплексной аналитической модели ввиду значительности его объема приводить не будем. Отметим только, что состав, тактико-технические характеристики элементов боевых порядков и информационные потоки рот *А* и *Б* схожие. Элементами каждой роты являются: командно-наблюдательный пункт (КНП) роты, средство разведки (СР), по три средства огневого поражения (СОП) в каждом из трех взводов. КНП взвода размещается на одном из его СОП. КНП каждой роты размещается на отдельном СОП. В роте *А* дополнительно присутствует элемент с функцией радиоэлектронного подавления (СРП), предназначенный для блокирования только информационных потоков противника и не влияющий на его СР. В примере всеми элементами боевых порядков используются ИТС УКВ-радиосвязи, местоположение и информацию которых вскрывает СР противника.

Каждый элемент в примере находится в секторе огневого поражения одного или нескольких СОП противника. Уровень информатизации элементов боевых порядков (доля задач, решаемых с использованием ИТС) равен 50%. Вероятность РЭП и разведки равна 1. Вероятность попадания СОП в цель равна 0,1. Вероятность разведки элементов противника с применением нетехнических средств равна 0,5. В примере моделировался бой длительностью 1,5 ч. Элементы боевых порядков местоположение не меняли.

Моделирование с данным набором исходных параметров проводилось на ПЭВМ с процессором типа Intel Core i5-2520M с объемом оперативной памяти,

равным 4 Гб. Время, которое потребовалось для вычислений, составило 2,5 мин в многопоточном режиме и 10 мин в однопоточном режиме.

Применение метода последовательных исключений для приведенного примера позволило получить следующие результаты для роты *А*.

На первом шаге получено значение усредненного весового коэффициента. Оно равно 0,083.

На втором шаге значение целевой функции (боевого показателя выигрыша в соотношении сил роты *А* над ротой *Б*) монотонно убывало с 34,7% в начале боя до 9,9% в конце боя. В качестве f_0 взято максимальное значение 34,7%, соответствующее полной работоспособности всех элементов системы.

На третьем шаге получен кортеж показателей целевой функции при исключении каждого элемента боевого порядка роты *А* поочередно (взяты начальные значения за период моделирования). Этот кортеж имеет вид:

F = <–9,9% (КНП роты) 3,9% (КНП 1 взвода)
3,9% (КНП 2 взвода) 3,9% (КНП 3 взвода)
–23,2% (СР) 0% (СРП)
7,1% (1 СОП) 7,1% (2 СОП)
7,1% (3 СОП) 7,1% (4 СОП)
7,1% (5 СОП) 7,1% (6 СОП) >.

Значение перераспределенного усредненного весового коэффициента всех элементов, кроме исключаемого, составило 0,09.

Значения весовых коэффициентов, полученные на четвертом шаге, показаны в виде гистограммы на рис. 2.

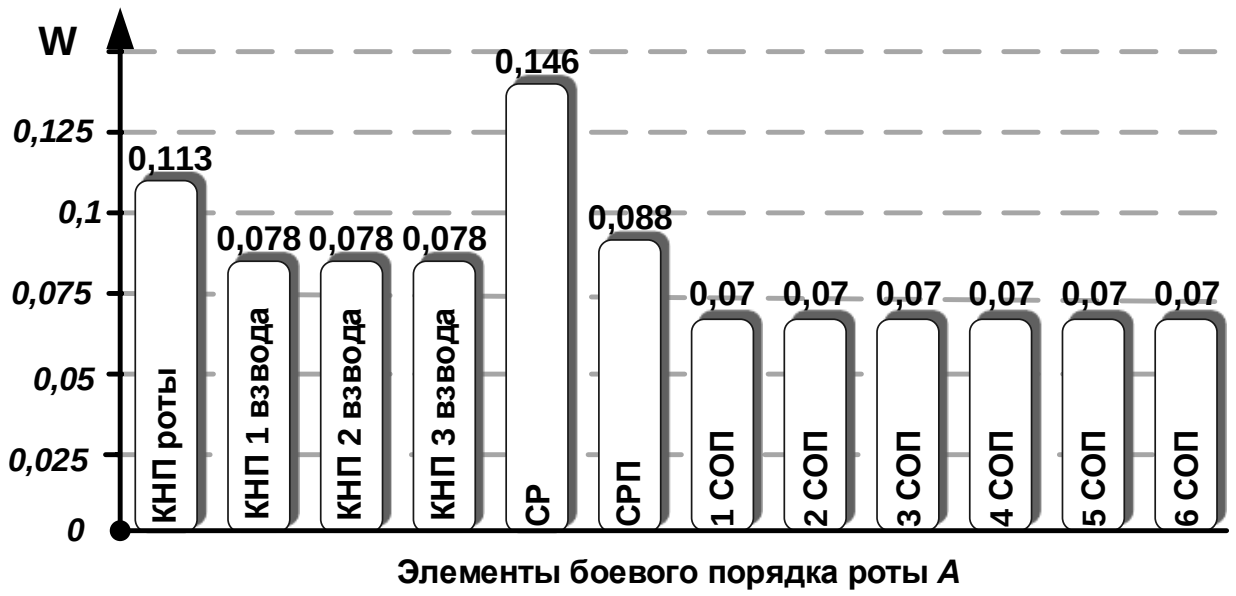

Рис. 2. Весовые коэффициенты элементов роты А (вариант)

Итоговая зависимость показателя выигрыша в соотношении сил роты *А* над ротой *Б* f_0 от времени показана на рис. 3.

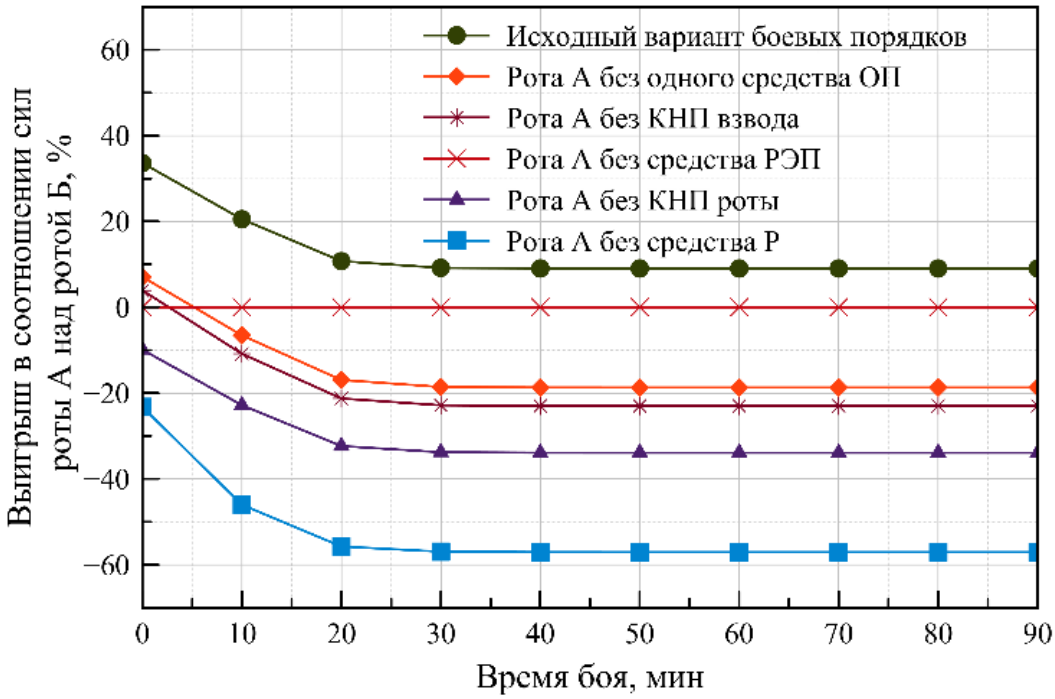

Рис. 3. Значение показателя f_0 в различные моменты боя

В ходе моделирования с применением метода последовательных исключений установлены следующие закономерности, согласующиеся с практикой.

1) Наибольший ущерб противнику наносится уничтожением его элементов боевых порядков с функцией разведки. Приоритет таких элементов перед элементами с функцией управления обусловлен тем, что элементы с исполнительными функциями могут получать разведданные не через элементы с функцией управления, а напрямую от элементов с функцией разведки, а также могут пользоваться собственными средствами разведки.

1) При равных условиях дополнительное применение средства РЭП одной из сторон дает значительный выигрыш в соотношении сил. В примере он составил от 34,7% в начале и до 9,9% в конце боя длительностью 1,5 ч. Такое убывание обусловлено постепенным уничтожением ИТС, которые обеспечивают информационное взаимодействие элементов стороны, не применяющей средства РЭП.

2) При планировании применения средств огневого поражения, разведки и РЭП в тактическом звене следует учитывать следующее отношение предпочтения элементов противника в начале боя:

   «элементы с функцией разведки $\succ$ элементы с функцией радиоэлектронного подавления $\succ$ элементы с функцией управления $\succ$ элементы с функцией огневого поражения».

   Поэтому в реальных условиях, когда средства разведки и ключевые пункты управления (командно-наблюдательные пункты) тщательно скрываются, средства РЭП являются наиболее приоритетными для уничтожения объектами.

Сравнительный анализ

Рассматриваемый в настоящей работе метод создан в ходе разработки именно вышеизложенной комплексной аналитической модели. Необходимость создания метода обусловлена стремлением авторов максимально сократить объем экспертных оценок при анализе общевойскового боя. Модели, аналогичные рассмотренной по возможностям учета разнородных факторов и процессов, оказывающих влияние на целевую функцию сложной ОТС, авторам не известны. Поэтому единственным объективным фактом, пригодным для сравнительного анализа предложенного метода с другими аналогичными подходами, на наш взгляд, можно считать то, что по оценкам отдельных экспертов вклад средств РЭП в соотношение сил противоборствующих формирований в общевойсковом бою является крайне низким (не более 10% от вклада средств огневого поражения). Именно такая экспертная оценка не согласовывалась с практикой и побудила авторов к разработке вышеизложенной комплексной аналитической модели и предложенного в настоящей статье метода, доказавших на реальных исходных данных, что вклад средств РЭП соизмерим с вкладом средств огневого поражения и является наиболее существенным в начале боя.

Заключение

Таким образом, предложен аналитический метод оценки весовых коэффициентов элементов сложных организационно-технических систем, который, в отличие от известных эмпирического и натурного методов, учитывает комплекс эффектов от применения элементов на уровне целевой функции системы, рассчитываемой с использованием этих же весовых коэффициентов. Идея метода состоит в последовательном вычислении значений показателя целевой функции систем без каждого из своих элементов и вычислении весового коэффициента каждого элемента по величине ущерба целевой функции, наносимого исключением этого элемента. Показан пример применения метода для решения задачи оценки весовых коэффициентов элементов боевого порядка воинских формирований в вооруженном противоборстве. В примере использована предложенная авторами комплексная аналитическая модель, позволяющая рассчитывать целевую функцию «выигрыша в соотношении сил» тактических воинских формирований. С применением метода получены согласующиеся с практикой закономерности боевого применения средств огневого поражения, разведки и радиоэлектронного подавления в общевойсковом бою. Метод может применяться в перспективных системах поддержки принятия решений для определения важности элементов сложных систем, минимизируя экспертные оценки.

Литература

1. Тараканов К. В. Математика и вооруженная борьба – М.: Воениздат, 1974. – 240 с.

2. Сосюра О. В. Расчет обобщенных показателей боевых возможностей войск в операциях (боевых действиях) с учетом эффективности управления ими (потенциально-долевой метод) – М.: Военная Мысль, 1997. – 142 с.

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

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

5. Ning L., Zhou W., Wei-Hua L., Xiao-Yang P., Guang-Hong G. Research on Construction and Interoperability of Complex Distributed Simulation System // Third Asian Simulation Conference (AsiaSim 2004). 2004. P. 131-140.

6. Hui-min C., An-xiang H., Lei X., JinSong L., BaiGang S., PeiHua Y. Research on Construction and Evaluation Methods of the Operation Simulation Environment // 16th Asia Simulation Conference and SCS Autumn Simulation Multi-Conference (AsiaSim 2016/SCS AutumnSim 2016). 2016. P. 315-324.

7. Yonglin L., Zhi Z., Qun L., Feng Y., Yifan Z. WESS: A Generic Combat Effectiveness Simulation System // 17th Asia Simulation Conference (AsiaSim 2017). 2017. P. 272-283.

8. Pelletier E. Battlefield Simulations for Canadian Army Indirect Fire Modernization Options Analysis // Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (WSC 2015). 2015. P. 2448-2455.

9. Asadi H., Schubert J. A Stochastic Discrete Event Simulator for Effects-Based Planning // Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (WSC 2013). 2013. P. 2842-2853.

10. Quade E. S. Analysis for Military Decisions. – The RAND Corporation, 1964. – 394 p.

11. Song X., Wu Y., Ma Y., Cui Y., Gong G. Military Simulation Big Data: Background, State of the Art, and Challenges // Mathematical Problems in Engineering. 2015. T. 2015. Article ID 298356. 20 p.

12. Wu. Y., Song X., Gong G. Real-time load balancing scheduling algorithm for periodic simulation models // Modelling Practice and Theory. 2015. T. 52. № 1. P. 123-134.

13. Костин Н. А. Методический подход к определению боевых потенциалов войсковых формирований // Военная Мысль. 2017. № 10. С. 33-48.

14. Резников Б. А., Калинин В. Н. Теория систем и управления. Структурно-математический подход – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1978. – 418 с.

15. Кутищев В. Д. Войны будущего: какими им быть? // Армейский сборник. 2012. № 4. С. 60-63.

16. Американская АСУВ FBCB2. // PENTAGONUS [Электронный ресурс]. 06.08.2012. – URL: http://pentagonus.ru/publ/amerikanskaja_asuv_fbcb2_2012/11-1-0-2201 (дата обращения: 30.05.2018).

17. Гирин А. В. Усовершенствованная методика определения боевых возможностей общевойсковой группировки войск // Военная Мысль. 2012. № 10. С. 26-30.

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

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

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

References

1. Tarakanov K. V. *Matematika i vooruzhennaya borba* [Mathematics and Armed Struggle]. Moscow, *Voenizdat Publ*., 1974. 240 p. (in Russian).

2. Sosura O. V. *Raschet obobshennich pokazateley boevich vozmozhnostey voisk v operachiyach (boevich deistviyah) s uchetom effectivnosti upravleniya imi (potencialno-delevoy metod)* [Calculation of Generalized Indicators of the Combat Capabilities of Troops in Operations (Combat Operations), Taking into Account the Effectiveness of their Management (the Potential-share Method)]. Moscow, *Military Thought Publ*., 1997. 142 p. (in Russian).

3. 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).

4. Korobeynikov A. S., Kholuenko D. S. *Effktivnost gruppirovki voisk radioelektronnoy borbi v hode kompleksnogo porazheniya informacionno-upravlyaushey sistemi protivnika* [Efficiency of the Electronic Warfare Troop in the Course of a Comprehensive Defeat of the Enemy's Information and Control System]. *Military Thought*, 2015, no. 8, pp. 30-34 (in Russian).

5. Ning L., Zhou W., Wei-Hua L., Xiao-Yang P., Guang-Hong G. Research on Construction and Interoperability of Complex Distributed Simulation System. *Third Asian Simulation Conference* (*AsiaSim 2004*), 2004, pp. 131-140.

6. Hui-min C., An-xiang H., Lei X., JinSong L., BaiGang S., PeiHua Y. Research on Construction and Evaluation Methods of the Operation Simulation Environment. *16th Asia Simulation Conference and SCS Autumn Simulation Multi-Conference* (*AsiaSim 2016/SCS AutumnSim 2016*), 2016, pp. 315-324.

7. Yonglin L., Zhi Z., Qun L., Feng Y., Yifan Z. WESS: A Generic Combat Effectiveness Simulation System. *17th Asia Simulation Conference* (*AsiaSim 2017*), 2017, pp. 272-283.

8. Pelletier E. Battlefield Simulations for Canadian Army Indirect Fire Modernization Options Analysis. *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference* (*WSC 2015*), 2015, pp. 2448-2455.

9. Asadi H., Schubert J. A Stochastic Discrete Event Simulator for Effects-Based Planning. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference* (*WSC 2013*), 2013, pp. 2842-2853.

10. Quade E. S. *Analysis for Military Decisions*. The RAND Corporation, 1964. 394 p.

11. Song X., Wu Y., Ma Y., Cui Y., Gong G. Military Simulation Big Data: Background, State of the Art, and Challenges. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, Article ID 298356. 20 p.

12. Wu Y., Song X., Gong G. Real-time Load Balancing Scheduling Algorithm for Periodic Simulation Models. *Modelling Practice and Theory*, 2015, vol. 52, no. 1, pp. 123-134.

13. Kostin N. A. *Metodicheskiy podhod k opredeleniu boevih potencialov voiskovih formirovaniy* [Methodical Approach to the Definition of Military Formations Combat Potentials]. *Military Thought*, 2017, no. 10, pp. 33-48 (in Russian).

14. Reznikov B. A., Kalinin V. N. *Teoriya system i upravleniya. strukturno-matematicheskiy podhod* [System and Management Theory. Structural-mathematical Approach]. Leningrad, *Mozhayskiy MISI Publ*., 1978, 418 p. (in Russian).

15. Kutishev V. D. *Voini budushego: kakimi im bit'?* [Future Wars: What Will Be They?]. *Army magazine*, 2012, no. 4, pp. 60-63 (in Russian).

16. American ASUV FBCB2 ch1 (2012). Available at: http://pentagonus.ru/publ/amerikanskaja_asuv_fbcb2_2012/11-1-0-2201 (accessed: 30.05.2018) (in Russian).

17. Girin A. V. *Usovershenstvovannaya metodika opredeleniya boevich vozmozhnostey obshevoiskovoy gruppirovki voisk* [Improved Methodology for Determining Combat Capabilities of a Combined Arms Troop Grouping]. *Military Thought*, 2012, no. 10, pp. 26-30 (in Russian).

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

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

20. Boyko A. A. *Sposob analiticheskogo modelirovaniya processa rasprostraneniya virusov v komputernih setyah razlichnoy strukturi* [The Analytical Modeling Method of the Virus Propagation Process in Computer Various Structures Networks]. *SPIIRAS Proceedings*, 2015, no. 5, pp. 196-211 (in Russian).

Статья поступила 30 мая 2018 г.

Информация об авторах

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

Дегтярёв Иван Сергеевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: методы оценки эффективности сложных систем. E–mail: degtyarev_is@mail.ru

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

The Weight Coefficient Estimation Method of Elements in Organizational and Technical Systems

A. A. Boyko, I. S. Degtyarev

Problem Statement: *An estimation of organizational and technical system element weight coefficients is used to solve a wide range of tasks (e.g. identifying effective units task in large organizations, priority objectives determination task for striking in armed confrontation, 'bottlenecks' detection task in spatial distributed telecommunication systems). There are two known methods of such estimation: empirical, that have low precision; natural, that require a lot of resources and enough static results amount of system functioning with various conditions.* ***Purpose*** *is to increase complicated organizational and technical system element weight estimation accuracy.* ***Used Methods:*** *A proposed method idea is about assign same average weight to all of system elements, and then calculate target function value without each of their elements sequentially and calculate real element weight coefficient according to target function damage, that appear by this element exclusion.* ***Novelty*** *of represented solution is to create analytical organizational and technical system element weight coefficient estimation method take into account effects complex of applying this elements on system target function level, that function is calculated with using this estimated weight coefficients.* ***Result:*** *Using of represented solution in functioning complicated organizational and technical system mathematical models allow to exclude human factor account and real experiment realization during these systems weight coefficient estimation. The solution provide inherent in analytical methods commonality and accuracy of complicated organizational and technical systems element weight coefficient estimation results.* ***Practical relevance:*** *The represented solution is realized in general military battle analytical model as program software same as "Blitzkrieg" that using in FBCB2, USA automatic battleforce management system. The suggested method in model is using to solve a problem of military units battle formation element weight coefficient estimation in armed confrontation. By using the method a combat fire-fighting, scouting and electronic warfare devices application regularities has been established in modern armed confrontation that are been confirming by practice.*

Keywords: *consequent exclusion method, weight coefficient, element, organizational and technical system, target function, armed confrontation modeling.*

Information about Authors

Aleksey Aleksandrovich Boyko – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Chief of Department. 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

Ivan Sergeevich Degtyarev – Doctoral Student. Junior researcher. Zhukovsky and Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: methods of assessing the effectiveness of complex systems. E–mail: degtyarev_is@mail.ru

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