

УДК 621.001

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОНФЛИКТНО-ОПТИМАЛЬНОГО ПРОГНОЗА В СИСТЕМЕ ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППИРОВОК УПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

Е.М. Воронов¹, В.А. Ефремов², А.Л. Репкин¹, С.И. Сычев²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: emvoronov@mail.ru; alexr_bmstu@mail.ru

²ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”, г. Королев,
Московская обл., Российская Федерация
e-mail: Kmo@Ktrv.ru

Рассмотрены основы проектирования системы оптимизационно-имитационного моделирования взаимодействия противокорабельной группировки управляемых средств поражения с многорубежной системой противовоздушной обороны морского ордера с учетом иерархии динамического и тактического управления ресурсами. Обоснована необходимость комбинации методов имитационного моделирования и конфликтно-оптимального прогноза взаимодействия для формирования сбалансированных по эффективности штатных режимов взаимодействия группировок. Сформирована методика конфликтно-оптимального прогноза взаимодействия в форме стабильно-эффективных компромиссов в многообъектных многокритериальных системах, функционирующих в условиях конфликтности и неопределенности. Для совмещения процессов прогноза и моделирования предложены направления ускорения прогноза от его учета при порубежной коррекции распределения ресурсов сторон до элементов прогноза при моделировании тактических изменений внутри рубежа взаимодействия систем.

Ключевые слова: оптимизационно-имитационное моделирование, групповое взаимодействие, управляемые средства поражения, морской ордер, целераспределение, многообъектная многокритериальная система, управление ресурсами, конфликтно-оптимальный прогноз, стабильно-эффективный компромисс, функциональная эффективность.

FUNCTIONAL PROPERTIES OF CONFLICT-OPTIMUM PREDICTION IN THE SYSTEM OF OPTIMIZATION-IMITATION MODELING OF INTERACTION BETWEEN GROUPS OF CONTROLLED MEANS OF DESTRUCTION

E.M. Voronov¹, V.A. Yefremov², A.L. Repkin¹, S.I. Sychev²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: emvoronov@mail.ru; alexr_bmstu@mail.ru

²ОАО “Tactical Rocket Armament Corporation”, Korolev, Moscow region,
Russian Federation
e-mail: Kmo@Ktrv.ru

Fundamentals of designing a system of optimization-imitation modeling of interaction between an anti-ship group of controlled means of destruction and a many-line system of air defense of naval formation taking into account the hierarchy of dynamical and

tactical management of resources are considered. The necessity for combining the imitation modeling methods and the conflict-optimum prediction of interaction for forming the regular modes of group interaction balanced in effectiveness is stipulated. A technique for conflict-optimum prediction of interaction is formed in the form of stably effective trade-offs in multi-object multi-criteria systems functioning under conditions of conflicts and uncertainty. To combine the prediction and modeling processes, the trends of accelerating the prediction are offered beginning from taking it into account at the line-to-line correction of resource distribution for parties to elements of prediction in simulating tactical changes inside the interaction range of the systems.

Keywords: optimization-imitation modeling, group interaction, controlled means of destruction, naval formation, objective distribution, multi-object multi-criteria system, resource management, conflict-optimum prediction, stably effective trade-off, functional effectiveness.

Современный уровень развития вооружения и военной техники характеризуется усилением взаимосвязей в системе, объединяющей носитель, высокоточные средства поражения, бортовые системы носителя, управляющие подготовкой оружия к применению, системы информационного обеспечения и целеуказания. В свою очередь, управляемое средство поражения (УСП), рассматриваемое как элемент иерархической многоуровневой структуры — системы вооружения, представляет собой сложную систему, состоящую из подсистем и элементов соподчиненных уровней.

Оптимизация обликовых характеристик УСП в составе сложной системы требует решения задач генерации и оценки проектных решений с учетом множества межуровневых и внутриуровневых связей в условиях неопределенности, вызванной интервальными оценками достижимых характеристик подсистем и УСП в целом, случайным характером внешних воздействующих факторов и неопределенностью выбора поведенческих стратегий противника [1]. Конечная цель синтеза проектных характеристик УСП состоит в формировании проектных решений, которые обеспечивают приемлемую целевую эффективность боевых комплексов и ударных группировок во всем диапазоне условий их функционирования и в пределах, доступных для создания и применения ресурсов УСП. При этом задачи формирования технического облика УСП и логики его применения в составе группировки боевых комплексов рассматриваются как части единой программы.

Специфическими особенностями синтеза рационального облика УСП в составе системы вооружения боевых комплексов являются:

- многокритериальный характер задачи оценки эффективности УСП в составе системы вооружения, обусловленный многообразием целей, необходимостью рассмотрения УСП в иерархической структуре системы боевых комплексов и учета экономических показателей;
- многоэкстремальный характер целевых функций, характеризующих качество УСП в системе оружия;

- большое число параметров управления проектными решениями по облику УСП, логике работы бортовых систем УСП и по тактическим характеристикам, подлежащим оптимизации;

- большое число и сложная структура ограничений, включающих в себя пределы изменения параметров оптимизации для получения допустимых проектных решений.

Получение численных оценок показателей функциональной эффективности связано с расчетом результативности различных фаз боевого функционирования группировки боевых комплексов с УСП, в том числе обнаружение и опознавание цели, определение зоны возможного нахождения цели, формирование координат точек прицеливания для каждого УСП, решение задачи целераспределения УСП, определение рубежа начала поиска цели системой наведения УСП, формирование залпа УСП, преодоление огневого и информационного противодействия ПВО обороняющейся цели, наведение УСП на заданные цели, поражение заданных целей.

Всесторонняя комплексная оценка функциональной эффективности, проводимая путем постановки натуральных экспериментов на этапе формирования технического облика УСП, связана с экономическими ограничениями и практически нереализуема. В эксперименте невозможно осуществить близкие к реальным условия боевого применения УСП в составе боевого комплекса и тем более группировки. В сложившейся ситуации для исследования функциональной эффективности наиболее целесообразно использовать методы имитационного моделирования.

Под имитационным моделированием понимают численный метод проведения экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложных систем в течение длительных периодов времени. Имитационная модель как компьютерный аналог сложного реального явления способна заменить эксперимент с реальным процессом экспериментом с математической моделью этого процесса. По мнению ряда разработчиков, имитационное моделирование — реальный шаг к интеллектуализации проектирования.

Математический аппарат, формализующий процессы боевого функционирования УСП при моделировании, может быть различным [2]. Вместе с тем, следует выделить три характерные задачи, которые необходимо решить на этапе формирования системы имитационного моделирования (СИМ).

1. *Формирование альтернативных вариантов проектных решений по облику УСП и его подсистем.* На этом этапе важную роль играет анализ основных факторов, определяющих облик УСП и его тактические характеристики. Формирование альтернативных вариантов проектных решений — неформальная стадия, результаты которой

во многом определяются индивидуальными способностями конструктора.

2. *Сравнение альтернативных решений по результатам моделирования боевых операций.* Практика показывает, что для любых технических средств обычно известны типовые сценарии и модели, инвариантные к различным условиям функционирования. Очень важно в процессе моделирования боевых операций установить функциональную связь параметров УСП с результатами функционирования системы. Перспективным может оказаться формирование вероятностных оценок на основе статистической обработки. Моделирование, как и реальный процесс, отражает случайные события, характеристики которых могут быть определены на вероятностном уровне. Поэтому одной из важных задач моделирования является накопление статистики и ее обработка.

3. *Анализ результатов моделирования и формирование вектора управляющих решений на основе этого анализа.* Практика системного подхода в задачах оценки и целевого управления эффективностью систем вооружения основывается на проведении функционально-стоимостного анализа в постановке стоимость–эффективность. В общей постановке целевое управление эффективностью обозначает поиск решений по достижению максимального эффекта с минимальными затратами. На практике максимизацию заменяют ограничивающими требованиями по минимально допустимому уровню наносимого ущерба.

Предлагаемые в настоящей работе архитектура построения и облик СИМ ориентированы на исследования функциональной эффективности противокорабельного оружия, применяемого по одиночным и групповым надводным целям, использующим все виды огневого и информационного противодействия, в том числе и с использованием авиационного прикрытия.

Выбор направления моделирования противокорабельного оружия в качестве основы формирования СИМ обусловлен спецификой целевой обстановки, условий и организации применения этого оружия. Относительная однородность фоноцелевой обстановки на морских театрах действий, возможность описания процессов функционирования противоборствующих групп с использованием ограниченного набора логико-временных циклограмм позволяют сформировать и отработать архитектуру универсальной СИМ на этом классе оружия.

В настоящее время наиболее важные проблемы противокорабельного оружия связаны с обеспечением выживаемости ракет в зонах ПВО атакуемой корабельной группировки (КГ), повышением избирательности и помехоустойчивости бортового комплекса управления.

Способы решения первой проблемы связаны с уменьшением времени пребывания противокорабельных ракет (ПКР) в зоне эффективного обстрела. Это может достигаться за счет повышения скорости, снижения высоты полета, уменьшения заметности ПКР, применения специальных мер, направленных на повышение выживаемости ПКР при непосредственном осуществлении атаки ее зенитными средствами. В качестве примера таких мер могут рассматриваться противоперехватное маневрирование, повышение живучести ракеты при попадании ее в зону поражения зенитного средства, применение индивидуальных средств помехового противодействия и др. Наилучшие результаты обеспечиваются комплексным применением различных технических и организационных мероприятий.

В основе построения системы лежит декомпозиция комплексной задачи моделирования взаимодействия группировки носителей, залпа ПКР и обороняющейся корабельной группировки на отдельные фрагменты, моделируемые автономно, с их увязкой посредством общей модели операции.

Повысить эффективность применения существующего вооружения по различной номенклатуре целей можно путем решения следующих задач:

- обоснования требований к облику и основным техническим характеристикам УСП;
- рациональной оценки эффективности разрабатываемых перспективных УСП;
- формирования тактики залпового применения УСП;
- формирования алгоритмов и логики работы бортовых систем УСП;
- рационализации состава бортовых систем УСП.

Система имитационного моделирования представляет собой программную экспертную систему моделирования взаимодействия авиационной группировки УСП и системы ПВО морского ордера (МО) надводных кораблей противника (далее КГ), в которой для конкретной задачи применения УСП с помощью модели знаний о предметной области в режиме диалога формируются варианты правил и моделей для сравнительной оценки эффективности рассматриваемых УСП и анализа тактики их применения по групповым надводным целям.

Система имитационного моделирования состоит из следующих независимых взаимодействующих подсистем (рис. 1):

- подсистема пользовательского интерфейса, которая обеспечивает интерактивный ввод исходных данных и управляющих воздействий, чтение (и запись) из подсистемы управления базами данных о конфигурациях конкретных типов моделируемых объектов, запускает процесс имитационного моделирования и отображает сводную таблицу результатов моделирования;

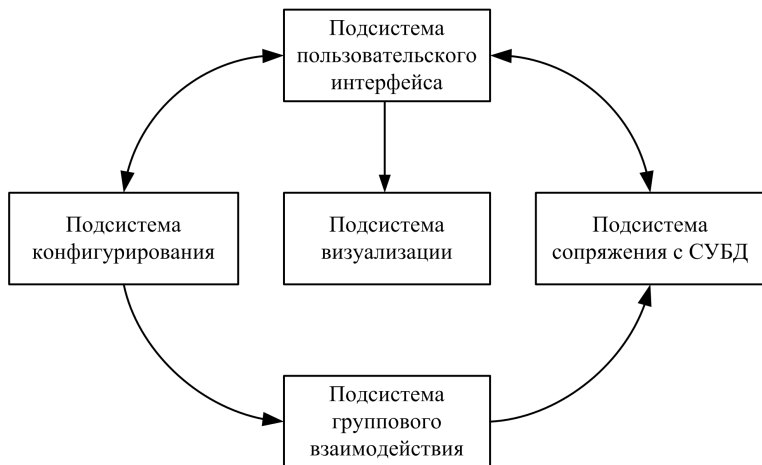


Рис. 1. Структура системы имитационного моделирования

- подсистема конфигурирования, которая используется для хранения исходных данных, необходимых для начала моделирования, в виде, понятном подсистеме группового взаимодействия;

- подсистема группового взаимодействия, которая моделирует взаимодействие группировки УСП и системы ПВО КГ, в рамках которой формируются математические модели технических средств (ТС) УСП и КГ, модели движения кораблей и носителей УСП, алгоритмы целераспределения и модели оценок функциональной эффективности;

- подсистема управления базами данных, которая используется для хранения массивов типовых моделируемых объектов и результатов моделирования и обеспечивает возможность их считывания для отображения подсистемой визуализации;

- подсистема визуализации, которая используется для отображения информации, полученной в результате конкретной реализации процесса имитационного моделирования, в двумерном или трехмерном виде.

В процессе работы над системой формируются:

- функционально-модульная структура СИМ боевого применения УСП;

- функциональные свойства и математические модели ТС и систем корабля в составе модели движения корабля с ресурсами ПВО и модели функционирования корабельных систем управления ресурсами ПВО на основе формирования внешней обстановки с учетом связи с моделями группировки авиационных УСП, обнаружения и взятия воздушных целей на сопровождение, распределения воздушных целей по каналам зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) с учетом факторов опасности, функционирования ЗРК большой, средней и малой дальности, функционирования системы радиоэлектронного подавления (РЭП) и др.;

— элементы сопряжения модели корабля и модели построения МО с комплектованием типов кораблей и учетом расположения ресурсов ПВО МО и его движения, с учетом моделей функционирования корабельных систем с обобщением задач формирования внешней обстановки, централизацией распределения целей в МО, координированием МО на основе цикла стрельбы с многозалповым режимом пуска зенитной управляемой ракеты (ЗУР) после распределения целей между кораблями и их ЗРК;

— функциональные свойства, наборы математических моделей ТС и системных структур группировки авиационных УСП (с формированием внешней обстановки с учетом связи с моделью МО), конфигурации группировки УСП из подгрупп ПКР с активным и пассивным наведением, траектории движения объектов группировки УСП в форме программ (кусочно-линейных траекторий) и в виде моделей комплексированного наведения с инерциальной навигацией и самонаведением на конечном участке, а также с учетом противоперехватных маневров уклонения УСП (пикирования, кабрирования, спирали, змейки и др.);

— алгоритмы оценки функциональной эффективности с учетом статистической оценки численностей и долей пораженных и непораженных средств взаимодействующих систем вооружения, числа израсходованных ракет ЗРК, ущерба, наносимого залпом ЗРК, математического ожидания числа кораблей МО, получивших заданную степень повреждения от группировки УСП, оставшейся степени плавучести одиночных кораблей МО, математического ожидания числа пораженных ЗРК, РЛС и других средств ПВО, числа промахнувшихся УСП;

— в составе модели МО и группировки УСП комбинированные алгоритмы целераспределения (ЦР) с многокритериальным ранжированием объектов по опасности;

— подсистемы пользовательского интерфейса, управления базами данных и отображения (визуализации).

В СИМ реализована двухуровневая структура модели. Верхний уровень (собственно операционная модель СИМ) представлен в виде разветвленного графа событий операции, описывающего логику действий сторон и формирующие результирующие события на фоне кинематической модели операции. Нижний уровень представлен моделями функционирования отдельных подсистем, участвующих в операции, и предназначен для получения параметрических оценок результатов их функционирования в зависимости от внешних условий.

В СИМ выбрана следующая структура моделей подсистемы группового взаимодействия системы ПВО МО и группировки авиационных УСП (рис. 2):

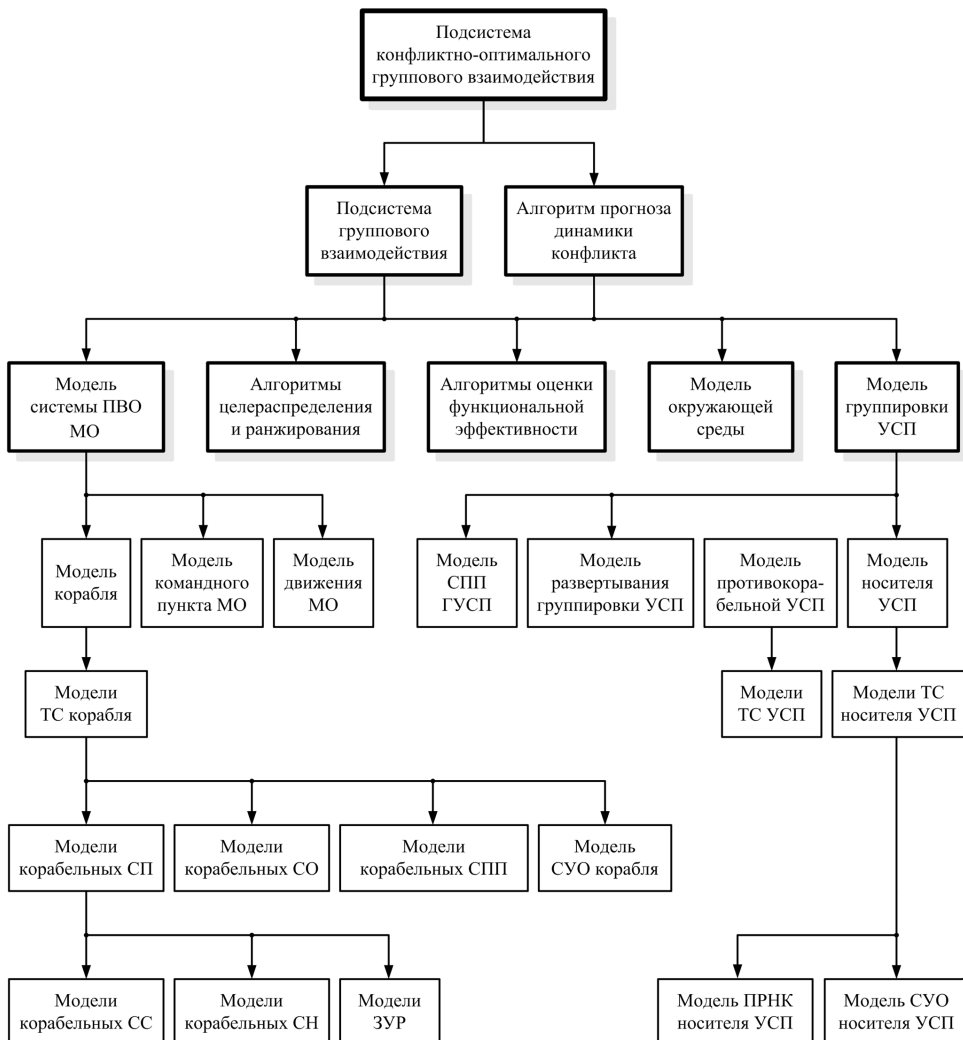


Рис. 2. Общая структура моделей группового взаимодействия:

СУО – система управления оружием; СП – средства поражения; СО – станции обнаружения; СПП – станции постановки помех; ГУСП – группировка управляемых средств поражения; СС – станции сопровождения целей; СН – станции наведения; ПРНК – прицельно-навигационный комплекс

- модель группировки УСП;
- модель МО;
- модель окружающей среды;
- алгоритмы ЦР и ранжирования;
- алгоритмы оценки функциональной эффективности.

Как следует из рис. 2, групповое взаимодействие имеет значительную структурную и функциональную сложность и представляет собой иерархическую многоуровневую систему со свойствами организационной и функциональной иерархии, а также иерархии математического описания. В целом, в рамках системного анализа, система группо-

вого взаимодействия является многоуровневой многообъектной многокритериальной системой с многорубежным противодействием системы ПВО МО налету ГУСП [2].

Модель группировки УСП решает следующие задачи:

- развертывание авиационной группировки самолетов-носителей УСП до пуска УСП;
- формирование конфигурации носителей УСП с пуском УСП без входа в зону действия системы ПВО МО;
- распределение подгрупп пассивных и активных УСП по кораблям МО с управлением мощностью подгрупп;
- формирование конфигурации группировки УСП на траектории (например, сведение в “импульсный объем”);
- формирование траекторий движения объектов группировки УСП на основе выбранных конфигураций моделей движения УСП, входящих в группировку, и формирование противоперехватных маневров уклонения в случае пуска ЗУР системой ПВО МО.

Модель МО решает следующие задачи:

- формирование конфигурации МО и его динамического развертывания во времени;
- формирование траекторий движения каждого корабля МО;
- формирование моделей функционирования корабельных систем с учетом помеховой обстановки;
- формирование цикла стрельбы (залп, одиночная стрельба, последовательная стрельба и т.д.) с учетом зон поражения ЗРК и траекторий перехвата воздушных целей;
- моделирование обнаружения воздушных целей корабельными РЛС и взятия их на сопровождение;
- формирование временных характеристик функционирования элементов системы ПВО.

Модель окружающей среды решает следующие задачи:

- формирование внешней обстановки — обеспечение связи системы ПВО МО с объектами группировки УСП;
- формирование погодных условий театра военных действий (ТВД) (сезон года, время суток, широта региона) и характерных для выбранного сезона, времени суток и широты на этом ТВД параметров атмосферы и моря.

Перечисленные задачи группировки УСП с учетом задач системы ПВО МО, их взаимосвязей и структурной иерархии систем порождают множество требований к функциональной эффективности группировки УСП в условиях ущерба, наносимого действиями системы ПВО МО. Поэтому возникает необходимость формирования многокритериальных оценок функциональной эффективности, обладающих полнотой отражения свойств эффективности при ограниченной размерности для достижения результата.

К таким оценкам относятся:

- статистические оценки численностей и долей пораженных и непораженных объектов взаимодействующих систем;
- математическое ожидание числа кораблей МО, получивших заданную степень повреждения от группировки УСП;
- оставшаяся степень плавучести одиночных кораблей МО;
- математическое ожидание числа пораженных ЗРК, РЛС и других объектов ПВО МО;
- число промахнувшихся УСП;
- ущерб, наносимый залпом ЗУР ЗРК;
- эффективность преодоления перехвата УСП залпом ЗУР ЗРК на дальнем, среднем и ближнем этапах многорубежной обороны с учетом эффективности огневых и информационных средств сторон, СПП, противозенитных маневров УСП;
- эффективные действия объектов группировки УСП такие, как развертывание группировки носителей до пуска УСП (пеленг, строй, шеренга, “звездный” налет), тактические приемы ГУСП (сведение в “импульсный объем”, разведение в строй и прочее логико-динамическое пространственное распределение УСП группировки), снижение эффективности ЗУР СПП ГУСП, применение УСП с пассивными и активными головками самонаведения (ГСН), в том числе в смешанном залпе и др. Учет эффективных действий объектов системы ПВО МО таких, как централизованное и распределенное управление ресурсами кораблей МО, эффективность корабельных СО, СС и СН, СУО и СПП корабля, перехвата УСП ЗУР и др.

Основными алгоритмами верхнего уровня иерархии сторон являются алгоритмы управления ресурсами: алгоритмы оптимального целераспределения и ранжирования целей по опасности на основе комбинирования задач назначения и логики выбора цели при целераспределении и многокритериальном экспертном сравнении альтернатив при ранжировании [3].

В СИМ подсистема группового взаимодействия связана с подсистемами конфигурирования и сопряжения с СУБД, которые, в свою очередь, обобщаются в подсистеме пользовательского интерфейса, включающего в себя подсистему визуализации.

В целом СИМ представляет собой статистическую операционно-имитационную модель управления ресурсами группировки УСП, сформированную на основе штатного (типового) сценария взаимодействия с системой ПВО МО.

В рамках штатного управления ресурсами ГУСП и СПВО МО имеет место большая вариабельность полученных результатов оценки эффективности ГУСП, главной причиной которой является структурно-функциональная сложность группового взаимодействия. Кроме того,

неполное знание наилучших тактических свойств, как правило, высокоорганизованной многорубежной обороны МО может преувеличить оценки функциональной эффективности группировки УСП.

Полезно в дополнение к штатным режимам взаимодействия ГУСП и СПВО МО сформировать новые свойства СИМ, ориентированные на конфликтно-оптимальное взаимодействие указанных систем.

Методы конфликтно-оптимального взаимодействия в настоящее время формализует теория оптимизации управления многообъектных многокритериальных систем (ММС), которые функционируют либо в условиях исходной структурной несогласованности, либо в условиях конфликта, либо в условиях неопределенности [4].

Модель конфликтно-оптимального взаимодействия ГУСП и СПВО МО состоит из двух многообъектных коалиций, к каждой из которых предъявлены многокритериальные конфликтные требования. Основной идеей оптимизации управления двухкоалиционной ММС является балансировка эффективности данных коалиций в условиях конфликта на основе методов устойчивого уравнивания коалиций по эффективности. Свойство межкоалиционной устойчивости означает, что если уравнивание достигнуто (найдена точка равновесия по показателям эффективности), то каждой из коалиций отклонение от него невыгодно, так как при отклонении управления ресурсами коалиции от равновесных управлений данная коалиция теряет в эффективности.

Следует иметь в виду, что найденная точка равновесного управления ресурсами указанных коалиций не делает ГУСП и СПВО МО равноэффективными, так как при разных ресурсных возможностях коалиций точка равновесия сдвигается в пользу более мощной коалиции, но главное свойство балансировки сохранится: отклонение приводит к потере эффективности.

Полезным качеством свойства балансировки коалиций является его робастная устойчивость при неполной информации. Если одна из коалиций, в нашем случае ГУСП, не имеет полной информации о наилучших тактических действиях многообъектной коалиции противника, то при формировании своего штатного режима управления ресурсами в окрестности точки равновесия ГУСП может ожидать наилучшую тактику формирования управления ресурсами СПВО МО также в окрестности точки равновесия. Тогда при отклонении штатного режима управления ресурсами СПВО МО от конфликтно-оптимального эффективность действий ПВО МО падает. Поэтому при неполной информации о тактике СПВО МО группировке УСП необходимо ориентироваться на равновесное противодействие СПВО МО.

Определение [4]. Если показатели эффективности коалиций скаляризованы, т.е.

$$J_{\text{ГУСП}} = \sum_i J_{i\text{ГУСП}}(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2), \quad J_{\text{СПВО}} = \sum_j J_{j\text{СПВО}}(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2),$$

где $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ — векторы управления ресурсами ГУСП и СПВО МО, то равновесный режим управления ресурсами $\mathbf{u}^p = (u_1^p, u_2^p)$ формирует систему неравенств критерия конфликтно-оптимальной эффективности сторон (равновесия по Д. Нэшу)

$$\begin{aligned} J_{\text{СПВО}}(\mathbf{u}_1^p, \mathbf{u}_2) &\leq J_{\text{СПВО}}(\mathbf{u}_1^p, \mathbf{u}_2^p), \\ J_{\text{ГУСП}}(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2^p) &\leq J_{\text{ГУСП}}(\mathbf{u}_1^p, \mathbf{u}_2^p), \end{aligned}$$

которая имеет смысл потери в эффективности коалиций СПВО МО и ГУСП при отклонении от равновесия, если другая сторона придерживается равновесия.

Для формирования и учета конфликтно-оптимальных равновесных решений СИМ обобщается до системы оптимизационно-имитационного моделирования (СОИМ) (рис. 3), которая помимо штатной операционно-имитационной модели включает в себя модель прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия для коррекции штатного режима управления ресурсами ГУСП и СПВО МО до уровня конфликтно-оптимального управления. Это повышает адекватность достижимых оценок эффективности группировки УСП по преодолению системы ПВО МО и поражению кораблей МО. Модель прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия реализуется в СОИМ посредством алгоритма прогноза динамики конфликта (ПДК), обращения к которому осуществляются последовательно или совместно. При последовательном использовании алгоритма уточняются параметры и условия выполнения штатного режима взаимодействия на каждом рубеже

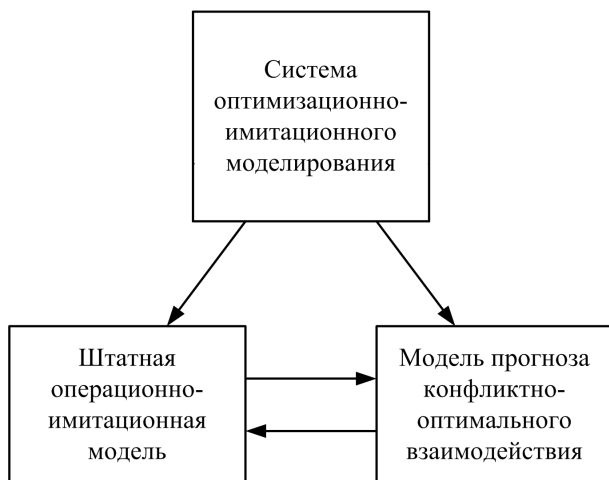


Рис. 3. Обобщенная структура СОИМ

взаимодействия (дальнем, среднем и ближнем) сторон. При совместном использовании алгоритма составляющие системы управления ресурсами сторон, такие как ЦР, тактика применения огневых и информационных средств и другие формируются с учетом конфликтно-оптимального прогноза непосредственно в процессе имитации [3, 5].

Таким образом, в процессе работы алгоритма ПДК формируются оценки конфликтно-оптимального потенциального ущерба и эффективности с использованием информации о текущей конфигурации объектов обеих сторон, тогда как в процессе работы штатной операционно-имитационной модели формируются уже фактические эффективность и ущерб.

Сложность разработки методов обеспечения эффективного управления ресурсами группировки УСП для преодоления конфликтно-оптимальной многорубежной системы ПВО МО приводит к необходимости использования именно СОИМ, которая имеет двойное назначение.

В первом варианте использования СОИМ применяется для проектирования и исследования методов управления ресурсами ГУСП при преодолении СПВО МО и поражении кораблей МО. Во втором варианте алгоритмическое обеспечение СОИМ формирует систему поддержки принятия решения при управлении ресурсами группировки УСП с учетом текущих тактических и информационных условий, прогноза динамики конфликта и потенциального ущерба сторон.

Модель прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия применяется на рубежных залповых тактах многорубежной системы ПВО МО на основе комбинации

$$КС \rightarrow ЦР \rightarrow РЦ \rightarrow ПДК \rightarrow ИПЦ \rightarrow ОПДК,$$

которая представляет собой обобщенное целераспределение (ОЦР), как функцию текущего состояния конфигураций взаимодействующих систем и конфликтно-оптимального прогноза [5].

В этой комбинации: КС — конфигурации систем на начало рубежного такта; ЦР — целераспределение ЗУР системы ПВО МО на основе решения задачи назначения и УСП на основе логики выбора цели; РЦ — ранжирование целей по многофакторной опасности (важности), которое позволяет выделить основную ограниченную подгруппу целей для ЦР при ограниченном числе целевых (огневых или информационных) каналов системы ПВО МО (РЦ дополняет или заменяет ЦР очередью целевых каналов); ПДК — прогноз динамики конфликта на основе динамики средних численностей объектов ГУСП и СПВО МО с учетом дисперсий численностей как функций средних численностей (следовательно, с учетом доверительных интервалов истинных численностей); ИПЦ — стохастическая имитация операции поражения

цели на основе стохастического моделирования; ОПДК — оптимизация ПДК в постановке конфликтно-оптимального прогнозирования на основе потенциального ущерба сторон.

Алгоритм получения обобщенного ЦР как результата прогнозирования конфликтно-оптимального взаимодействия ГУСП и СПВО МО на основе комбинации КС... ОПДК состоит из пяти этапов: учет текущей конфигурации в задаче ЦР, решение векторной задачи ЦР/РЦ, моделирование динамики конфликта, итерационное формирование конфликтно-оптимального прогноза, получение обобщенного ЦР на основе конфигурации ГУСП и СПВО МО и оптимального ПДК. При этом учет конфигураций приводит к введению четырех факторных характеристик эффективности воздействия $P_{ij}^{\theta\psi}$, где i — средство, находящееся в точке пространства θ , которое назначается для воздействия с вероятностью $P_{ij}^{\theta\psi}$ на j -ю цель, которая находится в точке пространства ψ . При этом величины $P_{ij}^{\theta\psi}$ формализуют относительные свойства конфигураций и получены как функции базовых вероятностей $P_{ij0}^{\theta\psi}$, дальностей $r_{ij}^{\theta\psi}$, уязвимости $l_{ij}^{\theta\psi}$ и других факторов, характеризующих конфигурацию систем. Основные этапы алгоритма получения обобщенного ЦР представлены на рис. 4, а общая схема алгоритма — на рис. 5.

На общей схеме алгоритма показаны основные управляющие параметры конфликтной ситуации: бивалентные параметры матрицы назначения γ_{ij} для алгоритма распределения ресурсов и доли активных средств сторон ν_{ij} для алгоритма прогноза динамики конфликта. Данные алгоритмы формируют общие свойства алгоритма получения обобщенного ЦР по управлению ресурсами сторон. На начальном этапе формируются конфигурации систем, которые в качестве обобщенных начальных данных конфликта передаются в алгоритм оптимизации управления ресурсами. Формирующееся в алгоритме начальное приближение управления (γ_{ij}, ν_{ij}) служит исходной точкой для оптимизации показателей на основе математической модели ПДК. По матрицам ЦР с учетом РЦ формируются управляющие векторы ЦР, которые передаются в модель ОПДК. Оптимальное управление ПДК, найденное при решении задачи прогноза, передается в процедуру ЦР, которая и формирует оптимальное управление ресурсами в форме назначения активных объектов СПВО МО на объекты ГУСП с учетом его конфликтно-оптимального противодействия.

Приведенная форма рассматриваемого алгоритма дает программно-корректируемый закон управления ресурсами, но достаточно сложна при многорубежном характере отражения налета и может быть упрощена последовательной процедурой его реализации. В этом случае на основе конфигурационных данных каждого исходного рубежа обороны СПВО МО решается задача конфликтно-оптимального прогноза



Рис. 4. Этапы алгоритма получения обобщенного ЦР

потенциального ущерба сторон на момент встречи ГУСП с системой ПВО МО, результаты которого в виде долей ν_{ij} активных средств поражения и защиты используются в обобщенном ЦР исходного рубежа. Данная последовательная форма алгоритма применяется как основная.

Совокупность управляющих параметров, функционалов потерь и динамической модели, формирующей однозначную связь между значениями управляющих параметров и функционалов потерь, порождает оптимизационную задачу прогноза динамики конфликта, результат решения которой в последовательном варианте реализации алгоритма КС... ОПДК должен быть передан в систему моделирования, чтобы повысить эффективность ЦР.

Процесс конфликтного взаимодействия по мере достижения объектами ГУСП пространственных положений, для которых наиболее целесообразно использование тех или иных видов ЗРК со стороны

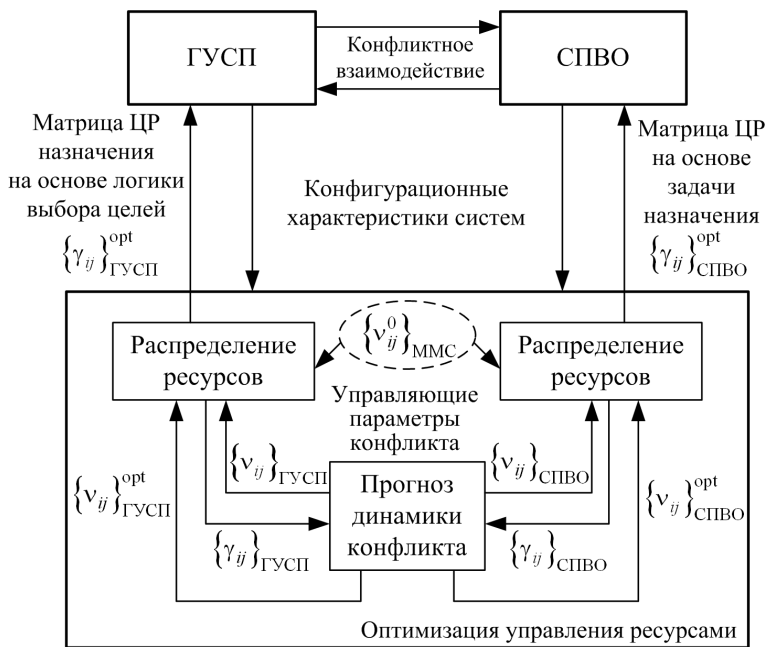


Рис. 5. Общая схема алгоритма получения обобщенного ЦР

СПВО (так как ЗРК различаются по дальности действия) разделен на три этапа: дальнего, среднего и ближнего взаимодействия.

Схема процесса взаимодействия ГУСП и СПВО МО по этапам показана на рис. 6, где обозначены моменты времени, соответствующие следующим событиям: T_0 — момент обнаружения группировки целей (ГУСП); T_1, T_2, T_3 — моменты вхождения целей в зону ЦР комплексов большой; средней и малой дальностей; T_4 — момент встречи целей с объектом обороны.

Для иллюстрации модели прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия, которая является основой для расширения СИМ до уровня СОИМ (см. рис. 3), без ограничения общности подхода рассмотрим структуру модели прогноза динамики конфликта и постановку задачи на основе приведенного алгоритма получения обобщенного ЦР для схемы, приведенной на рис. 6.

Рассматривается СПВО МО в общем случае из N кораблей. Вводятся следующие обозначения.

1. Переменные, характеризующие состояние системы:

X_1 и X_2 — число объектов ГУСП активного типа и информационного обеспечения;

$\bar{X}_{3i}, \bar{X}_{4i}$ и \bar{X}_{5i} — число объектов СПВО МО большой, средней и малой дальностей на i -м корабле;

X_{6i} — живучесть i -го корабля (число попаданий в борт корабля);

X_{7i} — боеспособность i -го корабля (число работающих излучающих станций).

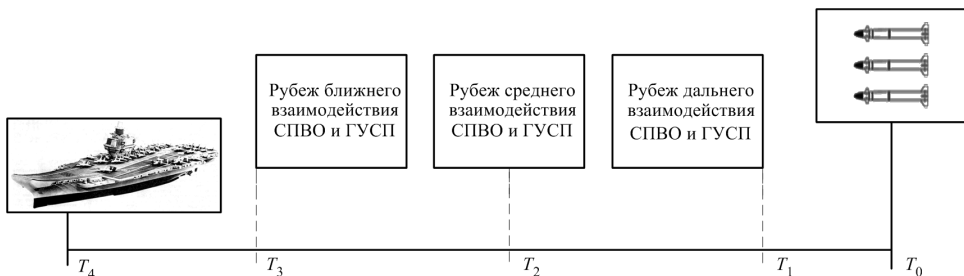


Рис. 6. Схема процесса взаимодействия ГУСП и СПВО МО

Соответственно запишем $X_6 = \sum_{i=1}^N X_{6i}$ – живучесть СПВО МО;
 $X_7 = \sum_{i=1}^N X_{7i}$ – боееспособность СПВО МО.

2. Параметры, характеризующие комплексы СПВО МО:

k_b , k_m и k_s – канальность комплексов большой, средней и малой дальностей.

Соответственно, число используемых ракет СПВО МО на такте конфликта

$$X_{3i} = k_b \cdot \bar{X}_{3i}; \quad X_{4i} = k_m \cdot \bar{X}_{4i}; \quad X_{5i} = k_s \cdot \bar{X}_{5i}. \quad (1)$$

Со стороны СПВО МО рассматривается как единый корабль, поэтому

$$X_3 = \sum_{i=1}^N X_{3i}; \quad X_4 = \sum_{i=1}^N X_{4i}; \quad X_5 = \sum_{i=1}^N X_{5i}. \quad (2)$$

В качестве начальных данных конфликта принимается показатель боезапаса, который не может быть меньше, чем потенциальное число ракет комплексов:

$$X_{30} \geq X_3; \quad X_{40} \geq X_4; \quad X_{50} \geq X_5.$$

Данный показатель может служить еще одним управляющим параметром при оптимизации управления ресурсами СПВО МО.

3. Переменные, характеризующие управляющие параметры:

λ_1 – доля объектов ГУСП, выделяемая на поражение борта корабля из оставшихся ресурсов после воздействия СПВО на всех тактах, изменяется от 0 до 1 с шагом в один объект ГУСП ($1 - \lambda_1$ – доля объектов ГУСП, выделяемая на поражение излучающих станций корабля);

λ_2 – доля объектов ГУСП, выделяемая при расхождении из импульсного объема, при переходе на третий такт конфликта (малая дальность). Может варьироваться от 0 до максимально возможного значения увеличения объектов ГУСП при расхождении из импульсного объема (число добавляемых объектов);

λ_3 – доля объектов СПВО МО большой дальности, выделяемая на поражение видимых объектов ГУСП, составляющих облако активных

целей, на первом такте взаимодействия (большая дальность), изменяется от 0 до 1 с шагом, пропорциональным числу активных средств комплексов большой дальности ($1 - \lambda_3$ — доля объектов СПВО МО большой дальности, выделяемая на поражение объектов ГУСП информационного обеспечения);

λ_4 — доля имеющихся объектов СПВО МО средней дальности, выделяемая на поражение объектов ГУСП активного типа на втором такте взаимодействия (средняя дальность), изменяется от 0 до 1 с шагом, пропорциональным числу активных средств комплексов средней дальности ($1 - \lambda_4$ — доля неиспользованных объектов СПВО МО средней дальности, которая может перейти на такт для малой дальности, но с меньшей эффективностью, если это будет целесообразно);

λ_5 — режим работы комплексов радиоэлектронной борьбы (РЭБ) СПВО МО. Изменяется от 0 до 1 с шагом, пропорциональным шкале деления мощности РЭБ СПВО МО (шаг — 0,25).

4. Переменные, характеризующие функционалы потерь:

$S_{\max i}$ — допустимое число поражений борта i -го корабля

$$S_{\max} = \sum_{i=1}^N S_{\max i};$$

$L_{\text{real}i}$ — допустимое число поражений РЛС i -го корабля

$$L_{\text{real}} = \sum_{i=1}^N L_{\text{real}i};$$

J_1 — функционал потерь ГУСП, имеет смысл отклонения действительного числа повреждений, нанесенных кораблю, от требуемого;

J_2 — функционал потерь СПВО МО, имеет смысл отклонения действительного числа объектов ГУСП, достигших цели, от требуемого.

Изменения номинальных вероятностей воздействия в зависимости от применения обеими сторонами средств РЭБ и РЭП:

для ГУСП

$$\begin{aligned} P_{1-6} &= P_{1-6 \max} \cdot e^{-\mu_1 \lambda_5}, \\ P_{1-7} &= P_{1-7 \max} \cdot e^{-\mu_2 \lambda_5}; \end{aligned} \quad (3)$$

для СПВО МО

$$\begin{aligned} P_{3-1}^I &= P_{3-1 \max}^I \cdot e^{-\mu_4 \lambda_5} \cdot e^{-\mu_3 X_2} (T_1), \\ P_{3-2}^I &= P_{3-2 \max}^I \cdot e^{-\mu_4 \lambda_5} \cdot e^{-\mu_3 X_2} (T_1), \\ P_{4-1}^{II} &= P_{4-1 \max}^{II} \cdot e^{-\mu_5 \lambda_5} \cdot e^{-\mu_3 X_2} (T_2), \\ P_{4-1}^{III} &= P_{4-1 \max}^{III} \cdot e^{-\mu_5 \lambda_5} \cdot e^{-\mu_3 X_2} (T_2), \\ P_{5-1}^{III} &= P_{5-1 \max}^{III} \cdot e^{-\mu_6 \lambda_5} \cdot e^{-\mu_3 X_2} (T_3). \end{aligned} \quad (4)$$

Приняты следующие обозначения базовых констант и их значения:

$P_{1-6 \max}$ — номинальная вероятность поражения борта корабля объектами типа ПКР; $P_{1-7 \max}$ — номинальная вероятность поражения РЛС корабля объектами типа ПКР; $P_{3-1 \max}^I$ — номинальная вероятность поражения объектов типа ПКР комплексами большой дальности; $P_{3-2 \max}^I$ — номинальная вероятность поражения самолетов информационного обеспечения комплексами большой дальности; $P_{4-1 \max}^{II}$ — номинальная вероятность поражения объектов типа ПКР комплексами средней дальности на втором такте средней дальности; $P_{4-1 \max}^{III}$ — номинальная вероятность поражения объектов типа ПКР комплексами средней дальности на третьем такте малой дальности; $P_{5-1 \max}^{III}$ — номинальная вероятность поражения объектов типа ПКР комплексами малой дальности. Вверху индексом указывается номер такта, который в программе характеризуется соответствующим номером элемента вектора вероятности (для остальных тактов она будет равна нулю);

μ_1 — коэффициент позитивного влияния мощности комплексов РЭБ на вероятность поражения борта корабля объектами типа ПКР; μ_2 — коэффициент позитивного влияния мощности комплексов РЭБ на вероятность поражения РЛС корабля объектами типа ПКР; μ_3 — коэффициент позитивного влияния самолетов информационного обеспечения на вероятность поражения объектов типа ПКР и самолетов информационного обеспечения комплексами большой, средней и малой дальности; μ_4 — коэффициент негативного влияния комплексов РЭП на вероятность поражения ПКР и самолетов информационного обеспечения комплексами большой дальности; μ_5 — коэффициент негативного влияния комплексов РЭП на вероятность поражения объектов типа ПКР комплексами средней дальности; μ_6 — коэффициент негативного влияния комплексов РЭП на вероятность поражения объектов типа ПКР комплексами малой дальности.

Рассмотрим *формирование математической модели конфликта* применительно к каждому такту взаимодействия. Поскольку в задаче принимается насыщенный налет со стороны ГУСП, то активные средства СПВО МО будут расходоваться в полном объеме.

На *первом такте* (за время $T_1 - T_2$) решают задачи долевого распределения ресурса комплексов большой дальности по объектам ГУСП для облака целей и объектов постановки помех, а также управления мощностью комплексов РЭП, которая будет влиять на эффективность взаимодействия для всех последующих тактов развития конфликта:

$$\begin{aligned}
X_1(T_2) &= X_1(T_1) - \lambda_3 X_3(T_1) P_{3-1}^I; \\
X_2(T_2) &= X_2(T_1) - (1 - \lambda_3) X_3(T_1) P_{3-2}^I; \\
X_3(T_2) &= 0; \\
X_4(T_2) &= X_4(T_0); \\
X_5(T_2) &= X_5(T_0); \\
X_{6i}(T_2) &= S_{\max i}; \\
X_{7i}(T_2) &= L_{\max i}.
\end{aligned} \tag{5}$$

На *втором такте* (за время $T_2 - T_3$) решается задача долевого распределения ресурсов комплексов средней дальности с применением оптимального числа ракет средней дальности по объектам ГУСП:

$$\begin{aligned}
X_1(T_3) &= X_1(T_2) - \lambda_4 X_4(T_2) P_{4-1}^{II}; \\
X_2(T_3) &= X_2(T_2); \\
X_3(T_3) &= X_3(T_2); \\
X_4(T_3) &= (1 - \lambda_4) X_4(T_2); \\
X_5(T_3) &= X_5(T_2); \\
X_{6i}(T_3) &= X_{6i}(T_2); \\
X_{7i}(T_3) &= X_{7i}(T_2).
\end{aligned} \tag{6}$$

На *третьем такте* (за время $T_3 - T_4$) решается задача управления объектами ГУСП по СПВО МО с учетом фактора расхождения из импульсного объема (управляющий параметр λ_2) в зависимости от значений эффективной отражающей поверхности (для ПКР с активным наведением) и мощности излучения корабельных станций (ПКР с пассивным наведением), при этом СПВО МО продолжает не различать тип объектов ГУСП:

$$\begin{aligned}
X_1(T_4) &= X_1(T_3) + \lambda_2 - (1 - \lambda_4) X_4(T_3) P_{4-1}^{III}(\lambda_5) - \\
&\quad - X_5(T_3) P_{5-1}^{III}(\lambda_5); \\
X_2(T_4) &= X_2(T_3); \\
X_3(T_4) &= X_3(T_3); \\
X_4(T_4) &= 0; \\
X_5(T_4) &= 0; \\
X_{6i}(T_4) &= X_{6i}(T_3) - \lambda_1 X_1(T_3) \lambda_{\text{ОП}_i} P_{1-6}; \\
X_{7i}(T_4) &= X_{7i}(T_3) - (1 - \lambda_1) X_1(T_3) \lambda_{\text{СВ}_i} P_{1-7},
\end{aligned} \tag{7}$$

где управляющие доли ГУСП $\lambda_{\text{ОП}_i}$ и $\lambda_{\text{СВ}_i}$ формируются операцией f (“разводкой” целей ГУСП по алгоритмам логики выбора целей) от-

дельно для ПКР с активным и пассивным наведением:

$$\lambda_{CB_i} = f_A(C_{CB}); \quad \lambda_{OP_i} = f_P(C_{OP}); \quad i = \overline{1, N};$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_{CB_i} = 1; \quad \sum_{i=1}^N \lambda_{OP_i} = 1; \quad (8)$$

$$CB = [CB_1, CB_2, \dots, CB_N];$$

$$C_{CB_i} = CB_i / \sum_{i=1}^N CB_i; \quad \sum_{i=1}^N C_{CB_i} = 1; \quad (9)$$

$$OP = [OP_1, OP_2, \dots, OP_N];$$

$$C_{OP_i} = OP_i / \sum_{i=1}^N OP_i; \quad \sum_{i=1}^N C_{OP_i} = 1;$$

здесь CB_i , OP_i , $i = \overline{1, N}$ – информация об излучении активных средств (РЛС) кораблей СПВО (параметр светимости, СВ) и о значении эффективной отражающей поверхности (ОП) бортов кораблей.

Функционалы потерь (для ордера меняется только структура первого показателя, где формируется эффективность ГУСП как суммарная эффективность действий по всем кораблям СПВО МО):

$$J_{1i} = \alpha_{11} (S_{\max i} - X_{6i}(T_4))^2 + \alpha_{12} (L_{\max i} - X_{7i}(T_4))^2,$$

$$i = \overline{1, N}; \quad J_1 = \sum_{i=1}^N J_{1i}; \quad (10)$$

$$J_2 = \alpha_{21} X_1(T_4) - \alpha_{22} (X_3^2(T_4) + X_4^2(T_4) + X_5^2(T_4))^{1/2} - \alpha_{23} (S_{\max i} - X_{6i}(T_4))^2. \quad (11)$$

Если данную математическую модель конфликтного взаимодействия рассмотреть при $N = 1$, то как частный случай формируется модель ПДК для одиночного корабля СПВО МО.

Приведенный пример постановки задачи отражает большую ценность прогнозирования конфликтно-оптимального взаимодействия для имитации штатных приемов управления ресурсами группировки УСП при преодолении и поражении СПВО МО, а также и полезность для самостоятельного применения в специализированной программной среде проведения расчетов Momdis [4] как расширение для программного продукта Matlab, разработанное специально для решения задач оптимизации многообъектных многокритериальных систем.

Использование СОИМ обеспечивает возможность проведения многофакторного анализа эффективности боевого применения, состава и технических характеристик УСП в зависимости от целевой многоканальности кораблей МО, степени насыщенности налета группировки УСП, изменения тактики обеих сторон и других факторов.

Применение СОИМ позволит уменьшить число натуральных работ и сократить сроки проектирования и отработки как бортовых систем, так и УСП в целом.

При внедрении имитационного моделирования в цикл разработки УСП появляется возможность сократить “брак” при проведении летных испытаний и снизить затраты на создание УСП. При этом реализация возможности более детальной проработки алгоритмов и бортовых систем УСП позволит обосновать облик перспективных УСП, повысив не только точностные характеристики, но и надежность наиболее важных систем УСП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярмолюк В.Н., Ефремов В.А., Сычев С.И. Оптимизация обликочных характеристик управляемых средств поражения методами имитационного моделирования // Фазотрон. 2012. № 1 (17). С. 66–70.
2. Воронов Е.М., Ефремов В.А., Сычев С.И. Конфликтно-оптимальное прогнозирование в системе имитационного моделирования взаимодействия группировок управляемых средств поражения // Фазотрон. 2013. № 1 (20). С. 38–43.
3. Алгоритм управления ресурсами на основе сравнения многокритериальных альтернатив и прогноза динамики конфликта / А.В. Борзунов, Е.М. Воронов, А.Л. Репкин и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. № 2. С. 3–29.
4. Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
5. Многокритериальная система ПВО корабля на основе оптимизационно-имитационного программно-корректируемого принятия решений / А.В. Борзунов, Е.М. Воронов и др. // Интеллектуальные системы: Труды IX Междунар. симпози. (Россия, Владимир, 28 июня – 2 июля 2010 г.). М.: РУСАКИ, 2010. С. 377–381.

REFERENCES

- [1] Yarmolyuk V.N., Efremov V.A., Sychev S.I. Optimization of the layout characteristics of guided weapons by simulation methods. *Fazotron* [Phasotron], 2012, no. 1 (17), pp. 66–70 (in Russ.). Available at: <http://www.phazotron.com/> (accessed 16 July 2013).
- [2] Voronov E.M., Efremov V.A., Sychev S.I. Conflict-optimal prediction in the simulation of interaction between groups of guided weapons. *Fazotron* [Phasotron], 2013, no. 1 (20), pp. 38–43 (in Russ.). Available at: <http://www.phazotron.com/> (accessed 16 July 2013).
- [3] Borzunov A.V., Voronov E.M., Repkin A.L. A resource management algorithm based on comparing multi-criteria alternatives and forecasting the dynamics of conflicts. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2006, no. 2, pp. 3–29 (in Russ.).
- [4] Voronov E.M. *Metody optimizatsii upravleniya mnogoob'ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnykh kompromissov* [Methods to optimize the control of multi-criteria multi-object systems based on stable-effective compromises]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2001. 576 p.

[5] Borzunov A.V., Voronov E.M. Mnogorubezhnaya sistema PVO korablya na osnove optimizatsionno-imitatsionnogo programmno-korrektiruemogo prinyatiya resheniy [Multi-frontier shipboard air defense system based on optimization-simulation software corrected decision making]. *Tr. 9 Mezhdunar. simpoz. "Intellektual'nye sistemy"* [Proc. 9th Int. Symp. "Intelligent Systems"]. Moscow, RUSAKI Publ., 2010, pp. 377–381.

Статья поступила в редакцию 21.02.2013

Евгений Михайлович Воронов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории управления и ее приложений.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.M. Voronov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of theory of control, control systems and its applications.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Алексей Леонидович Репкин — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 30 научных работ в области теории управления. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.L. Repkin — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Research Institute for Information Technologies and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications in the field of theory of control.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Владимир Анатольевич Ефремов — канд. техн. наук, генеральный конструктор ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”. Автор более 100 научных работ в области теории управления.

ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”, Российская Федерация, 141075, Московская обл., г. Королев, ул. Ильича, д. 7.

V.A. Yefremov — Cand. Sci. (Eng.), general designer of ОАО “Tactical Rocket Armament Corporation”. Author of more than 100 publications in the field of theory of control.

ОАО “Tactical Rocket Armament Corporation”, ul. Il'icha, 7, Korolev, Moscow region, 141075 Russian Federation.

Станислав Игоревич Сычев — начальник отдела ОКБ ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”. Автор более 30 научных работ в области теории управления.

ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”, Российская Федерация, 141075, Московская обл., г. Королев, ул. Ильича, д. 7.

S.I. Sychev — head of department of ОАО “Tactical Rocket Armament Corporation”. Author of more than 30 publications in the field of theory of control.

ОАО “Tactical Rocket Armament Corporation”, ul. Il'icha, 7, Korolev, Moscow region, 141075 Russian Federation.