

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 629.76:623.462 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.14.23 EDN DBLHKP

**О способах выбора требований  
к точностным характеристикам систем наведения  
баллистических ракет дальнего действия**

**Г. Г. Вокин**, *д. т. н., профессор, [snegiri\\_11@mail.ru](mailto:snegiri_11@mail.ru)*  
«НИИ КС им. А. А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»,  
г. Королев, Московская область, Российская Федерация

**М. И. Макаров**, *д. т. н., профессор, [snegiri\\_11@mail.ru](mailto:snegiri_11@mail.ru)*  
«НИИ КС им. А. А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»,  
г. Королев, Московская область, Российская Федерация

**А. М. Гуменюк**, *к. т. н., снс, [snegiri\\_11@mail.ru](mailto:snegiri_11@mail.ru)*  
«НИИ КС им. А. А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»,  
г. Королев, Московская область, Российская Федерация

**Аннотация.** Сформирован класс нетрадиционных оптимизационных задач, нацеленных на поиск экономически оптимальных или близким к ним требований к системам наведения и к их подсистемам. Сформированы аналитические и численно-аналитические или близкие к ним совокупности алгоритмических процедур решения названных выше задач. При использовании решений упомянутых задач на этапе исследовательского проектирования ожидается сокращение сроков формирования систем наведения и значительное снижение экономических затрат на их создание. Рекомендуемые авторами способы выбора близких к оптимальным требований к подсистемам систем наведения позволяют выбрать из альтернативных такую структуру системы наведения, которая обеспечивает экономически оптимальное управление от старта к цели. На конкретных данных просматривается ожидаемая экономическая целесообразность определения оптимальных требований по точности. Предложенные способы могут быть использованы не только на этапе проектирования системы наведения, но и при экспертных оценках рациональности выбранных структур перспективных систем наведения, а также как один из путей научно обоснованного прогнозирования оптимальных тактико-технических характеристик систем наведения.

**Ключевые слова:** межконтинентальная баллистическая ракета, система наведения, требования к подсистемам, алгоритмы оптимизации, уровень защиты цели, вероятность поражения цели

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

## Methods for Selecting Requirements for the Accuracy Characteristics of Long-Range Ballistic Missile Guidance Systems

**G. G. Vokin**, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., [snegiri\\_11@mail.ru](mailto:snegiri_11@mail.ru)*

*Maksimov Space Systems Research Institute — a Branch of FSUE Khrunichev State Research  
and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russian Federation*

**M. I. Makarov**, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., [snegiri\\_11@mail.ru](mailto:snegiri_11@mail.ru)*

*Maksimov Space Systems Research Institute — a Branch of FSUE Khrunichev State Research  
and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russian Federation*

**A. M. Gumenyuk**, *Cand. Sci. (Engineering), [snegiri\\_11@mail.ru](mailto:snegiri_11@mail.ru)*

*Maksimov Space Systems Research Institute — a Branch of FSUE Khrunichev State Research  
and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russian Federation*

**Abstract.** This article discusses a new class of optimization problems that aim to find economically optimal or near-optimal requirements for guidance systems and their subsystems. The authors have developed analytical and numerical-analytical algorithmic procedures to solve these nonconventional optimization problems. By using these solutions during the research design stage, significant reductions in the economic costs and time required for the formation of guidance systems can be achieved. The authors propose methods for selecting close-to-optimal requirements for guidance system subsystems, which enable the selection of economically optimal control structures from among alternative options. The economic feasibility of determining the optimal accuracy requirements is demonstrated based on specific data. The proposed methods can be used not only for designing guidance systems, but also for expert assessments of promising guidance system structures, and as a scientifically-based prediction tool for optimal performance characteristics of guidance systems.

**Keywords:** intercontinental ballistic missile, guidance system, subsystem requirements, optimization algorithms, target protection level, target hit probability

## Введение

Как свидетельствует история, в ранние времена человеческой цивилизации расстояние между сражающимися воинами-противниками условно равнялось длине их вытянутых рук, позже — длине пика и дальности действия стрел, ружей или пушек, но длина современной «пики», имея в виду, например, баллистическую ракету дальнего действия, может достигать многих сотен и тысяч километров. Для реализации таких «пик» требуются очень и очень немалые затраты материальных средств, людских сил и человеческого интеллекта.

В настоящее время в связи с большой стоимостью упомянутых «пик»-ракет дальнего действия (БРДД) и их систем наведения (СН) в условиях экономии средств на вооружение возникают задачи обеспечения экономически оптимального поражения целей, то есть цели должны поражаться с заданной вероятностью при минимально необходимых точности СН и мощности заряда. Речь идет, в частности, о выборе таких структур и задании таких тактико-технических характеристик (ТТХ) СН, при которых задача управления движением ракеты должна решаться, например, при минимуме экономических затрат. Алгоритмизация этого процесса направлена на более обоснованный выбор структуры СН и формирования требований к ее подсистемам как проектируемым, так и перспективным, которые до настоящего времени определяются, как правило, на основе очень приближенных расчетов, опытных данных и экспертных оценок. В связи с этим возникает необходимость в комплексном решении задач синтеза структур СН и выбора требований к их подсистемам с учетом связей характеристик СН с показателями боевой эффективности. При таком подходе основное значение приобретает обратная задача: по требуемым характеристикам поражения цели необходимо определить оптимальные значения ТТХ СН и ее показатели, так как прямой задаче (определению характеристик поражения, например вероятности поражения целей при заданных ТТХ ракеты), носящей в общем пассивный характер, в литературе уже уделялось должное внимание [1].

Решение прямой задачи связано, по существу, с непосредственным перебором с некоторым шагом или случайным поиском всевозможных значений ТТХ ракет и их СН и с определением в резуль-

тате поиска вероятности поражения цели не ниже требуемой и при возможно меньшей стоимости поражения. Однако при таком подходе не гарантируется выбор оптимальных значений ТТХ СН и минимальная стоимость поражения цели с учетом, например, ограничений на ряд других характеристик. Кроме того, возникает задача, нацеленная на значительное уменьшение машинного времени, необходимого на перебор ТТХ, которое существенно возрастает при увеличении числа возможных структур СН и типов целей, подлежащих поражению.

В связи с этим совершенно естественно возникают актуальные вопросы по формализации и алгоритмизации поиска оптимальных или близких к ним основных или части из них ТТХ ракет и их СН, обеспечивающих поражение заданных целей с требуемой вероятностью и с минимальной стоимостью. Поиску соответствующих подходов и способов предназначены представленные в статье результаты проработок упомянутых проблемных вопросов.

Для полноты изложения заметим, что функционально устоявшаяся структура СН включает три основные подсистемы: систему подготовки исходных геодезических данных (СПИГД), инерциальную систему управления ракетой (ИСУ) и систему прицеливания (СПР). Эти подсистемы могут быть построены на различных физических принципах действия, и к ним могут предъявляться требования, например, по точности различных уровней. Как показали исследования и практика, устанавливать подсистемы коррекции на боевых блоках (ББ) баллистического типа нет смысла по определению, потому что на них нельзя получить информацию извне в силу высокой температуры (1500–2000 °С) теплозащитного покрытия и области ударного уплотнения.

На перспективных крылатых субблоках принципиально могут быть установлены различного рода подсистемы коррекции, самонаведения, информационные подсистемы и подсистемы доразведки целей [2].

В случае применения крылатых субблоков требования будут отыскиваться к точности попадания и к величине заряда в обычном оснащении, то есть в данном случае речь будет идти только о безъядерном варианте оснащения, ибо радиус поражения ядерного заряда на два порядка и более превосходит ошибку попадания.

## **Об актуальности, назначении и возможностях предлагаемых способов в процессах исследовательского проектирования систем наведения**

С учетом ранее высказанных соображений уместным будет отметить, что предлагаемые в статье постановки и решения задач не являются исчерпывающими и полномасштабными, потому что на самом деле упомянутые проектно-расчетные технологические процедуры в практически полном объеме являются трудноформализуемыми с математической точки зрения. Мало того что для полномасштабного решения задач требуется использовать статистические данные о всех важнейших прошлых разработках, которые сами по себе страдают неточностью обобщения и представления, так выдвигаемые задачи не решаются аналитически точно, а только приближенно, к тому же оптимизируемые функционалы многоэкстремальны и недостаточно в полной мере могут отражать требуемые качества изделия. При этом получаемые решения являются уязвимыми в отношении доказательств существования их единственности, потому что они зависят, в частности, от технологии и продолжительности поиска приближенных решений. В связи с этим применительно к практике получаемые решения следует считать ориентировочными и они должны корректироваться с учетом интеллектуального опыта проектантов-разработчиков и результатов экспериментальных испытаний.

На этой основе оптимальными решениями упомянутых задач мы будем считать решения в упрощенных, несколько идеализированных постановках, которые могут быть исходными и отправными данными при выборе финальных вариантов требований и структур СН с учетом экспертных корректировок, основанных на использовании результатов испытаний разрабатываемых изделий в условиях, приближенных к реальным.

Но в то же время необходимо отметить, что как бы ни было сложно формулировать оптимизационные задачи и искать их решения доступны-

ми методами, все же это необходимо выполнять при исследовательском проектировании, потому что проектант в силу естественной информационной и вычислительной ограниченности своих возможностей оказывается не в состоянии экспертными приемами всесторонне и глубоко охватить весь процесс технологии проектирования изделия. При этом, несмотря на приближенность получаемых расчетным путем решений, они являются объективными отправными вариантами дальнейших поисков оптимальных или рациональных решений. Более того, даже при решении упрощенных задач проектант получает богатый экспертный опыт по оценке результатов.

В связи с изложенным есть основания полагать, что предлагаемые решения оптимизационных задач в известной мере являются демонстрационным, учебно-методическим и, пожалуй, единственным интеллектуальным инструментом при исследовательском проектировании таких изделий, как системы наведения ракет и их подсистемы. Надо отметить также, что это замечание справедливо и для широкого спектра других изделий, проектируемых с использованием приемов исследовательского поиска рациональных вариантов. При этом для соблюдения объективности ситуации необходимо отметить также следующее обстоятельство: в связи с тем, что в предыдущие годы запасы по точности и для инерциальных систем, и для подсистем коррекции СН отсутствовали, требуемая точность попадания и требуемая точность всех подсистем системы наведения устанавливались на уровне возможно достижимых их значений. К настоящему времени в связи с достижениями в приборостроении, а также в связи с включением в структуру СН подсистем коррекции движения крылатых субблоков на основе использования дистанционно-кибернетической технологии доставки зарядов к цели появились ощутимые запасы точности по всем подсистемам СН, что делает более актуальным и эффективным использование расчетных способов определения экономически оптимальных требований к точностным характеристикам подсистем. Это обстоятельство с учетом проведения сравнительных оценок дает основание сделать заключение о целесообразности и актуальности разработки и совершенствования математических подходов, способов,

алгоритмов и соответствующих математических процедур экономически оптимального определения требований к точностным характеристикам подсистем, что в конечном счете может способствовать экономии средств и является важным и побуждающим фактором широкого использования упомянутых математических инструментов при исследовательском проектировании систем наведения.

## Постановка обобщенной задачи по выбору требований к подсистемам СН и ее структуры

Баллистические ракеты дальнего действия предназначены, как известно, для поражения стратегически важных целей на межконтинентальной дальности. В случае использования перспективных ракет, наводимых на цели по дистанционно-кибернетической технологии, оказывается эффективным применение обычных тротильных зарядов, потому что интеллектуализированная система наведения может обеспечить высокоточное наведение на цель вплоть до прямого попадания [2]. Но, к сожалению, такие ракеты еще не созданы. Обсуждаются только принципы и возможности их построения в перспективе [5].

Первичными данными, из которых исходят при определении требований к ракетам, является требуемая вероятность поражения  $P_{тр}$  цели, которая характеризуется, как известно, уровнем защищенности  $\Delta P_{\phi}$  кг/см<sup>2</sup>. Отметим, что рациональная величина нормы поражения  $P_{тр} \geq 0,8, \dots, 0,9$  определяется на базе военно-экономических исследований и анализа задач боевых операций. При этом ориентировочно для поражения зданий ударная волна должна создавать давление не менее 0,3 кг/см<sup>2</sup>, а для поражения ракетных шахт  $\Delta P_{\phi}$  должно быть не менее 100 кг/см<sup>2</sup>.

К настоящему времени разработан ряд методик определения значений вероятности поражения целей при условии пуска одного или нескольких боевых блоков по цели [1].

Принимаем, что вероятность поражения  $P$  цели одним боевым блоком (ББ) (без учета надежности

доставки и вероятности преодоления системы ПРО) может быть определена по известной формуле:

$$P = 1 - \exp\left(\frac{-R_{п}^2}{2\sigma^2}\right), \quad \text{где } R_{п} = \frac{2\sqrt[3]{q}}{\sqrt{\Delta P_{\phi} - 0,25}}, \quad (1)$$

$\sigma = \frac{1}{3}T$ ,  $T = \frac{1}{2}(\Delta L + \Delta Z)$  — точность попадания (круговая ошибка),  $\Delta L$ ,  $\Delta Z$  — предельные ошибки СН по дальности и направлению;

$R_{п}$  — радиус поражения цели;

$q$  — тротильный эквивалент мощности заряда;

$\Delta P_{\phi}$  — уровень защищенности цели.

Решение задач оптимального распределения требований при экономичном управлении связано с предварительным определением ряда зависимостей между основными характеристиками ракеты и точностью попадания. Анализ технико-экономических показателей и основных ТТХ ракет и их СН, а также опыт машиностроения и приборостроения свидетельствует о том, что вид функциональных зависимостей экономических и основных боевых ТТХ ракет и их СН математически покрывается кривыми или полиномами не выше второго–третьего порядков. С достаточной для практики точностью при исследовательском проектировании (десятые–первые единицы процентов) коэффициенты аппроксимирующих полиномов отыскиваются при использовании соответствующей статистической информации с помощью известных способов аппроксимации, например при использовании метода наименьших квадратов.

Анализ технико-экономических показателей и зависимостей между упомянутыми характеристиками привел к выводу, что стоимость СН и заряда можно представить в виде функции

$$C_1 = C_{сн} + C_q, \quad (2)$$

где  $C_{сн} = A_{т} + \frac{B_{т}}{T^2}$ ,  $C_q = \sum_{i=1}^n A_{qi}q^{i-1}$ ;

$A_{qi}$ ,  $A_{т}$ ,  $B_{т}$  — коэффициенты, определяемые при аппроксимации зависимостей стоимости СН и заряда от соответствующих характеристик.

На рис. 1 условно представлены характерные виды зависимостей стоимости СН и величины заряда от точности попадания и от тротильного эквивалента заряда. Также условно показано смещение упомянутых кривых при уменьшении или повышении требуемого радиуса поражения.

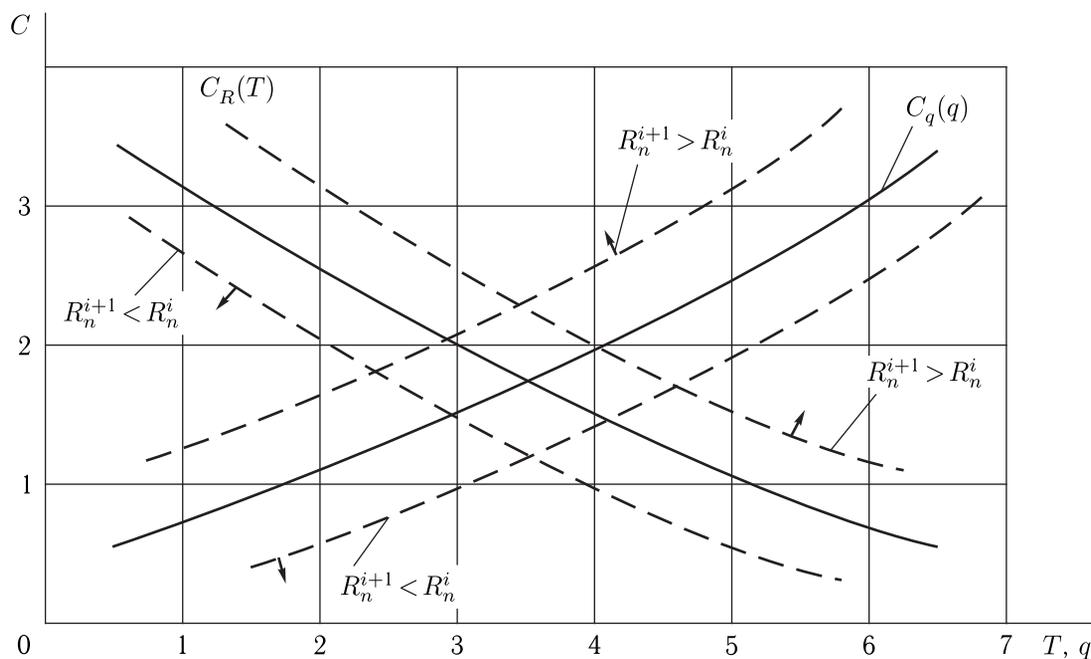


Рис. 1. Виды типовых трендов зависимостей стоимости СН и мощности заряда от точности попадания и от величины тротилового эквивалента

После этих пояснений предварительных исходных предпосылок и данных сформулируем следующую задачу: с какой ошибкой попадания, с какой мощностью заряда ББ и с какими требованиями к подсистемам СН и информационным средствам наиболее экономически целесообразно поразить цель с заданной вероятностью?

Такая задача оптимального распределения требований является обратной традиционно решаемой, как правило, при исследовательском проектировании в процессе определения вероятности поражения цели при заданных ТТХ ракеты.

Решение обратной задачи ведет к сокращению затрат в процессе многоступенчатого случайного поиска экономически рациональных, оптимальных или близких к ним требований к ТТХ ракеты и к системам ее наведения. В статье представлено концептуальное решение поставленной задачи. С учетом специфики проектируемых изделий предлагаемую методологию можно с успехом применить и для решения задач, аналогичных рассматриваемым, в частности при определении требований по точности к информационным средствам подсистем СН и при использовании соответствующих моделей ошибок.

### Методический подход и способ выбора близких к экономически оптимальным требованиям к подсистемам системы наведения

Анализируя и исследуя на этапе исследовательского проектирования составных частей ракетного оружия различные варианты совокупностей ТТХ, для которых в соответствии с поставленной задачей необходимо найти оптимальные значения требований или на некоторые из них наложить специальные ограничения, можно получить целый ряд вариантов структур систем наведения и требований к ее подсистемам при экономичном поражении целей с заданной вероятностью. Такие задачи наиболее естественно формулируются и решаются на основе использования процедур метода неопределенных множителей.

В общем случае упомянутые выше основные характеристики  $X_i$  (стоимость, вероятность поражения и т.п.) не только являются функциями точности попадания  $T$  и мощности заряда  $q$ , но и зависят также от других характеристик  $\gamma_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Имеем

$$X_i = X_i(T, q, \gamma), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Поэтому, естественно, можно положить, что если одна из характеристик оптимизируется, то с целью обеспечения синергетичности процесса синтеза на другие характеристики необходимо наложить ограничения вида

$$X_i \in X_i, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

Опираясь на технологию использования метода неопределенных множителей, оптимальные значения характеристик  $T$  и  $q$ , а также других характеристик  $\gamma_i$  могут быть найдены в результате решения следующей системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \gamma_i} = 0, \quad X_i = \bar{X}_i, \quad i = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n,$$

где  $\Phi = X_k + \sum_1^n \lambda_i (X_i - \bar{X}_i)$ ;  $\gamma_1 = T$ ,  $\gamma_2 = q$ ;  $\gamma_3, \gamma_4, \dots, \gamma_m$  — другие характеристики СН,  $\lambda_i$  — неопределенные множители.

Без уменьшения общности в качестве примера для одного из вариантов выбора требований к ТТХ (случай, когда минимизируется стоимость с обеспечением заданного значения такой важнейшей характеристики, как вероятность поражения цели) приведем вывод уравнений, позволяющих определить экономически оптимальные требования к точности  $T$  СН при обеспечении заданной вероятности поражения  $P_{\text{тр}}$  цели на уровне ее защищенности, равном  $\Delta P_{\text{ф}}$ .

Для решения задачи составим функционал

$$\Phi = C_1 + \lambda(P - P_{\text{тр}}),$$

в котором выражения для определения величин  $C_1$  и  $P$  соответствуют зависимостям (1) и (2).

Используя вычислительную процедуру метода неопределенных множителей, построим систему уравнений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial T} = 0, \quad P - P_{\text{тр}} = 0, \quad (3)$$

в результате решения которой находятся оптимальные требования к ошибке кругового рассеяния  $T_{\text{опт}}$

для случаев одного или целого ряда уровней защиты  $\Delta P_{\text{ф}}$  цели.

Система уравнений (3) может быть решена только приближенными численными способами, потому что возможность решения ее в квадратурах даже не просматривается.

Для решения упомянутой системы можно использовать следующие способы:

– метод Ньютона [3], при этом первые приближения переменных можно задавать, например, в диапазонах

$$20_{\text{кТ}} \leq q \leq 1,5 \text{ мгт}, \quad 0,1 \text{ км} \leq T \leq 2 \text{ км}, \\ N_{\text{н}} \leq \lambda \leq N_{\text{в}},$$

$N_{\text{н}}, N_{\text{в}}$  — достаточно большие числа, устанавливаемые опытным путем в процессе вычислений;

– метод Гаусса–Зейделя, при этом осуществляется поиск минимума-минимума функционала:

$$\text{minimum } F(T, q, \lambda),$$

$$\text{где } F(T, q, \lambda) = \frac{\partial \Phi}{\partial q} + \frac{\partial \Phi}{\partial T} + P - P_{\text{тр}},$$

реализовав достаточно большое число кругов оптимизации до выполнения условия:

$$F(T, q, \lambda) \leq \delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  — достаточно малое число;

– способ случайного поиска с использованием датчика случайных чисел при варьировании переменных в диапазонах, приведенных выше, до выполнения условий (4).

Вычислив таким образом оптимальные или, точнее, близкие к оптимальным значения  $T_{\text{опт}}$  и  $q_{\text{опт}}$  для принятых при исследовательском проектировании целого ряда гипотетически возможных структур СН и подставив их в выражение (2), получим близкие к минимальным экономические затраты на поражение ряда типовых целей при использовании СН с различными требованиями к ее подсистемам.

Произведя аналогичные расчеты для различного числа  $N$  ( $N = 1, 2, \dots$ ) пусков по различным целям и получив соответствующие стоимости  $C_i^{(1)}$ ,  $C_i^{(2)}$ ,  $C_i^{(N)}$ , получаем возможность выбрать близкую к экономически оптимальной структуру СН на основе соотношения

$$C_{\text{опт}} = \min \{C_{ik}^{(1)}, C_{ik}^{(2)}, \dots, C_{il}^{(N)}\}, \quad k = 1, 2, \dots, l,$$

где  $l$  — число рассматриваемых вариантов структур СН, назначаемых экспертным путем.

Полученные требования к СН по точности попадания могут быть обеспечены целым рядом вариантов структур, построенных как на базе инерциальных командных приборов различной физической основы, так и на основе применения систем коррекции, использующих для уточнения местоположения внешнюю информацию, имея в виду использование системы ГЛОНАСС, эталонные карты местности (рельефы, радиолокационные и оптические карты) и излучений или образов целей. Отметим, что подсистемы коррекции обеспечивают более высокую точность, чем близкая к оптимальной точность при использовании на активном участке инерциальной СУ.

Рассматриваемые способы выбора структур СН могут быть использованы не только как средство при проектировании СН, но и как средство экспертных оценок рациональности принятых решений при разработке СН, а также как один из путей научно-технического обоснования требований к их ТТХ.

Для обеспечения различных уровней точности экспертным путем можно построить варианты возможных структур СН как совокупности инерциальной СУ ракеты и подсистем с различными уровнями требований в силу использования информационных средств, построенных на различных физических принципах; число вариантов возрастает также и в связи с использованием платформенных или бесплатформенных систем управления ракеты, а также с использованием бортовых или наземных систем прицеливания.

В результате сравнения оптимизируемых структур с точки зрения близости к экономически оптимальной выбирается та структура, для которой выполняется соотношение

$$C_{\text{ко}}^{mo} = \min \{C_1^{(m)}, C_2^{(m)}, \dots, C_n^{(m)}\},$$

$$m = 1, 2, \dots, N,$$

где  $N$  — число рассматриваемых вариантов структур; при этом другие характеристики будут не ниже заданных в силу накладываемых ограничений при синергетической процедуре оптимизации.

## Пример выбора рациональных требований к подсистемам системы наведения ракеты

На основе анализа затрат на создание образцов подсистем СН по статистическим данным организаций промышленности построены зависимости их стоимости от точности. Для аналитических расчетов указанные зависимости приближенно аппроксимированы следующими функциями (стоимость выражена в тысячах рублей, ошибки — в километрах).

Для инерциальной СУ на активном участке

$$C_{\text{ису}} = 175 + \frac{1180}{T_{\text{ису}}^2}, \quad (5)$$

для системы прицеливания

$$C_{\text{спр}} = 8 + \frac{115}{T_{\text{спр}}^2}, \quad (6)$$

для системы подготовки исходных геодезических данных

$$C_{\text{игд}} = 10 + \frac{0,2}{T_{\text{игд}}^2}. \quad (7)$$

Модель ошибки системы наведения (без подсистем коррекции) ракеты имеет вид:

$$T_{\text{сн}}^2 = T_{\text{ису}}^2 + T_{\text{спр}}^2 + T_{\text{игд}}^2, \quad (8)$$

где  $T_{\text{ису}}$  — ошибка инерциальной СУ ракеты,

$T_{\text{спр}}$  — ошибка системы прицеливания,

$T_{\text{игд}}$  — ошибка системы подготовки исходных геодезических данных.

Напомним, что оптимальное значение  $T_{\text{сн}}^{\text{тр.опт.}}$  находится предварительно в результате решения ключевой системы (3). Ошибка  $T_{\text{сн}}^{\text{тр.опт.}}$  может быть оптимальным образом распределена затем между инерциальной системой управления ракеты, системой прицеливания и системой подготовки исходных геодезических данных на основе использования процедуры метода неопределенных множителей с учетом соотношений (5)–(8). При этом оптимальные требования к подсистемам находятся в результате решения системы уравнений:

$$\frac{\partial \Phi_{\text{п}}}{\partial T_{\text{ису}}} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_{\text{п}}}{\partial T_{\text{спр}}} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_{\text{п}}}{\partial T_{\text{игд}}} = 0,$$

$$T_{\text{сн}} - T_{\text{сн}}^{\text{тр.опт.}} = 0,$$

где  $\Phi_{\text{п}} = C_{\text{ису}} + C_{\text{спр}} + C_{\text{игд}} + \lambda(T_{\text{сн}} - T_{\text{сн}}^{\text{тр.опт.}})$ .

Отметим для примера, что близкая к экономически оптимальной ошибка попадания  $T_{\text{СН}}^{\text{тр.опт.}}$ , равная 1 км, будет рациональным образом распределена, если оптимально допустимые ошибки ИСУ, СПР и СП ИГД будут соответственно равны

$$T_{\text{ису}} = 0,87 \text{ км}, \quad T_{\text{спр}} = 0,49 \text{ км}, \quad T_{\text{игд}} = 0,06 \text{ км}.$$

Надо особо подчеркнуть, что такое распределение ошибок оказалось очень близким к реальным ошибкам и усредненным экспертным оценкам проектантов-разработчиков СН.

Полученные выше значения ошибок любой из подсистем можно использовать для определения близких к экономически оптимальным требований к информационным средствам (разного рода датчиков соответствующих параметров) подсистем, сформулировав и решив задачи описанными выше способами, используя при этом модели ошибок и модели стоимости по аналогии с предыдущим примером.

Анализ процессов распределения требований и выбора структур СН свидетельствует о том, что

завышение точности без необходимости может существенно увеличить (на десятки–сотни тысяч рублей) общую стоимость СН еще на этапе формирования ТТХ к СН.

Для системы коррекции на конечном участке траектории можно также решить задачу распределения требований к точности попадания и к величине мощности заряда, но только обычного, поскольку точность системы наведения в этом случае как минимум на порядок превосходит точность инерциальной системы управления ракеты.

На рис. 2 приведена схема программно-аппаратной реализации поиска близких к экономически оптимальным структур и требований к СН и их подсистемам при исследовательском проектировании важнейших составных частей БРДД.

Программно-алгоритмический комплекс может быть реализован на базе достаточно производительной ПЭВМ, при этом должны быть разработаны соответствующие сервисные средства и дру- жественные интерфейсы, что должно в конечном

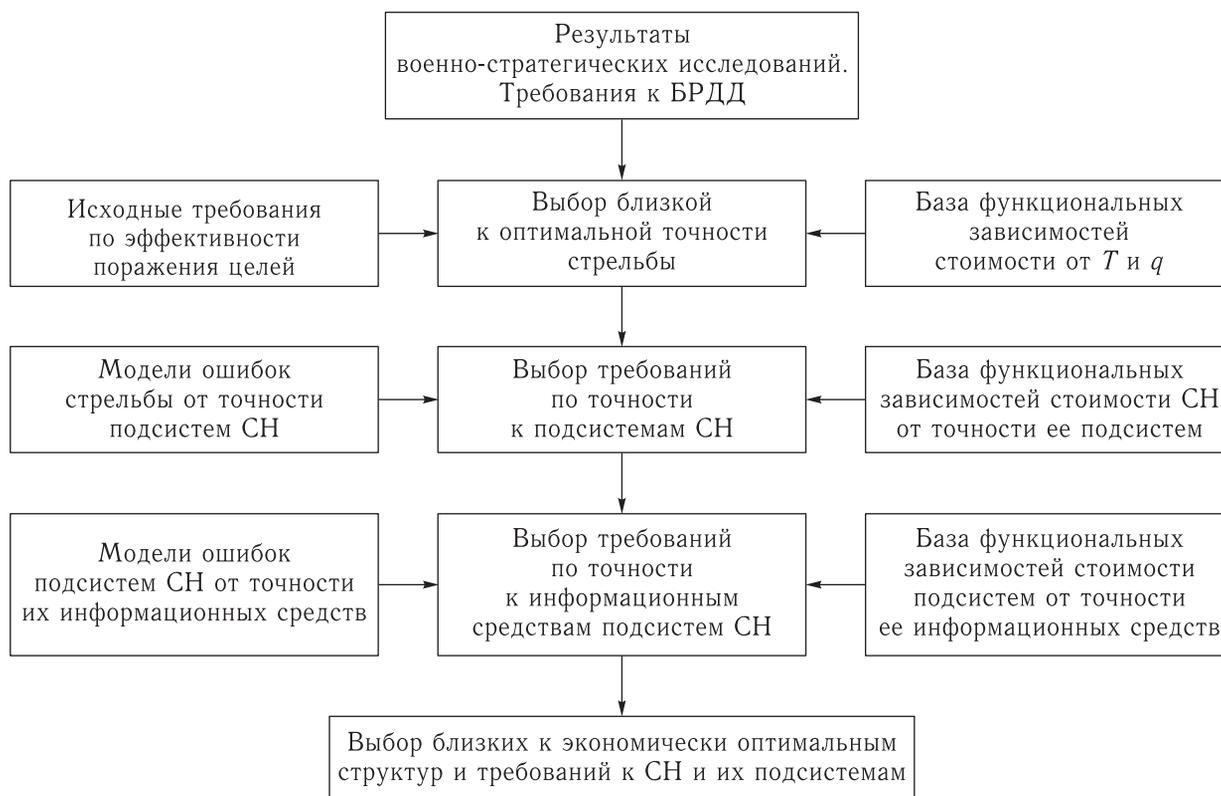


Рис. 2. Структурно-функциональная схема выбора близких к экономически оптимальным структур СН и требований к ее подсистемам

счете способствовать повышению эффективности работы пользователей-проектантов как специалистов по исследовательскому проектированию систем наведения БРДД и их подсистем.

## Заключение

Предложенные способы алгоритмизируют процессы определения близких к экономически оптимальным требований к точности попадания ББ с учетом требований к ракете, например, по вероятности поражения целей. Рекомендуемые способы выбора близких к оптимальным требований к подсистемам СН позволяют выбрать из альтернативных такую структуру СН, которая обеспечивает экономически оптимальное управление от старта к цели. На конкретных данных просматривается ожидаемая экономическая целесообразность определения оптимальных требований по точности.

Предложенные способы могут быть использованы не только на этапе проектирования СН, но и при экспертных оценках рациональности выбранных структур перспективных СН, а также как один из путей научно обоснованного прогнозирования оптимальных ТТХ систем наведения. Однако для объективной оценки ситуации надо подчеркнуть, что организации-разработчики СН до сих пор обоснованиями требований занимаются в сокращенном виде, при этом в качестве требуемой точности принимают, как правило, возможно достижимую точность попадания.

На этой основе можно объяснить имеющее место на практике правило: требуемой точностью считать точность, предельно достижимую при испытаниях.

Имея определенный опыт в сфере затронутых в статье вопросов, с позицией проектантов-разработчиков систем наведения БРДД нет достаточных оснований не согласиться, хоть это и связано с дополнительными экономическими затратами.

## Список литературы

1. Сак В.Н., Лушанин А.И., Шупейко Г.Г. Эффективность вооружения и боевых действий РВСН. М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского, 1970.
2. Вокин Г.Г. Дистанционно-кибернетическое оружие — альтернатива оружию ядерному? Приглашение к размышлениям и к поиску решений. Москва–Королёв: ООО «Триада-С», 2022. 112 с.
3. Канторович Л.В. О методе Ньютона // Труды математического института им. В.А.Стеклова, 1949, т. 28. С. 104–144.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
5. Вокин Г.Г., Макаров М.И. Концептуальные основы создания оружия нового класса — дистанционно-кибернетического оружия // Военная мысль, 2020, № 8. С. 117–125.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 23.03.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 03.05.2023