

УДК 007.3/354

Г.Н. МАЛЬЦЕВ, доктор технических наук,
профессор
А.Ю. ОНУФРЕЙ, доктор технических наук,
профессор
А.В. РАЗУМОВ, доктор технических наук,
профессор

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ПОСТАНОВКЕ НАУЧНОЙ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДИССЕРТАЦИЯХ ПО ВОЕННО-НАУЧНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ

В статье рассматривается проблема формализованной постановки научной задачи исследования, которая решается в диссертации путем декомпозиции ее на ряд частных задач, объединенных единой целью исследований. Показаны роль и место постановки научной задачи во взаимосвязи с целью, предметом, объектом и методами исследования. Общий подход к постановке научной задачи исследования технических систем сформулирован в терминах теории эффективности с использованием основных показателей целенаправленных процессов – результативности, ресурсоемкости и оперативности. Приведены примеры постановки задачи для наиболее характерных направлений исследования военно-прикладных задач: для задачи выбора наиболее предпочтительного варианта построения технической системы, для задачи выбора наилучших технических решений в рамках заданной структуры технической системы, для задачи с комплексным технико-экономическим показателем эффективности.

Ключевые слова: постановка задачи исследования; формализованная постановка научной задачи; эффективность технических систем; результативность; ресурсоемкость; оперативность; показатели эффективности; критерии эффективности; критерий оптимальности; критерий пригодности.

Введение

Защита диссертации на соискание ученой степени является формой государственной аттестации научных кадров, порядок которой регламентирован «Положением о присуждении ученых степеней»¹ и «Положением о присуждении ученых степеней лицам, использующим в своих работах сведения, составляющие государственную тайну»², утвержденными Постановлениями Правительства Российской Федерации. Аттестация научных кадров проводится путем представления к защите результатов выполненных научных исследований в форме диссертации на соискание учёной степени кандидата или доктора наук. Как научная квалификационная работа, диссертация призвана показать научной общественности овладение соискателем методологией научных исследований и его весомый личный вклад в науку. По результатам защиты диссертации соискателю присуждается ученая степень.

Квалификационные требования относятся не только к диссертации в целом и уровню полученных в ней научных результатов, но и к структуре и форме представления результатов диссертации. В диссертации должны быть определены объект, предмет и границы исследования, сформулированы цель работы и решаемая научная задача (для кандидатских диссертаций) или проблема (для докторских диссертаций), показаны метод проведения научного исследования и достижения поставленной цели. Одним из важных атрибутов и квалификационных признаков диссертаций по военно-научным специальностям является формализованная постановка научной задачи исследования, которая решается в диссертации путем декомпозиции ее на ряд частных задач, объединенных единой целью исследований.

¹ Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней».

² Постановление Правительства РФ от 17 марта 2015 г. №235 «О порядке присуждения ученых степеней лицам, использующим в своих работах сведения, составляющие государственную тайну».

В настоящей статье на основе накопленного опыта работы в диссертационных советах по научным специальностям военно-технических наук представлены методические рекомендации по формализованной постановке научной задачи исследования в диссертациях по отрасли технических наук. Представленные рекомендации могут рассматриваться как дополнение к изложенным в работах [1; 2] подходу к формулировке базовых понятий диссертации по военно-научным специальностям, направленному на совершенствование системы подготовки научных кадров в процессе проведения диссертационных исследований, и неформальным требованиям к автору диссертации и его научной квалификации, выполнение которых необходимо для признания его состоявшимся ученым.

1. Роль постановки научной задачи исследования в диссертации

В настоящее время ученые степени кандидата и доктора наук присуждаются в Российской Федерации по номенклатуре научных специальностей, переход к которой был осуществлен в 2021 году в соответствии с Приказом Минобрнауки России «Об утверждении номенклатуры научных специальностей»³. В диссертациях по группе научных специальностей военно-технических наук, входящей в область военных, военно-технических и военно-специальных наук, объектом исследования, как правило, являются средства вооружения и военной техники. Современные средства вооружения и военной техники являются сложными техническими системами. Они характеризуются целым рядом характеристик, определяющих их технические и эксплуатационные свойства. Для таких объектов правильная и корректная постановка задачи принципиально необходима как отправная точка в исследованиях. Она позволяет на начальных этапах определить характеристику (свойство) и показатель (систему показателей) объекта исследования, с улучшением которых связана поставленная цель исследований при принятых ограничениях, и определить направления разработки предполагаемых научных результатов, а зачастую и способы их достижения. Постановка задачи является обязательным элементом при проведении диссертационных исследований и призвана в концентрированном виде логически стройно и математически точно представить решаемую задачу и цель исследования.

Под постановкой задачи понимается краткое, логически упорядоченное обобщение направления исследований, целей и путей их достижения⁴. Методологический смысл постановки задачи состоит в том, чтобы определить ожидаемый результат и метод выполнения исследования. В соответствии с критериями, предъявляемыми к диссертациям, постановка научной задачи должна учитывать достигнутые результаты в предметной области и определять такой ожидаемый результат, который будет обладать научной новизной по сравнению с достигнутыми результатами и практической значимостью.

Как научные квалификационные работы, диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук отличаются уровнем полученных результатов. Основным признаком кандидатской диссертации по отрасли технических наук является решение научной задачи, имеющей существенное значение для развития соответствующей отрасли знаний. Основным признаком докторской диссертации по отрасли технических наук является решение научной проблемы, имеющей важное значение для соответствующей области деятельности. Научная проблема отличается от научной задачи масштабом и глубиной предмета исследования, уровнем результатов, высокой степенью их научной и практической значимости, но в обоих случаях с формализованной постановкой научной задачи в значительной степени связаны выбор метода научного исследования, формулировка частных задач исследования и достижение цели диссертации.

³ Приказ Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. №1027 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. №1093».

⁴ Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология: словарь системы основных понятий. М.: Либроком, 2013. – 208 с.

В целом постановка научной задачи диссертации, с одной стороны, придает строгость и логическую направленность представленным в диссертации научным результатам, с другой стороны, характеризует научную квалификацию автора диссертации – соискателя ученой степени. В общем случае следует различать по меньшей мере три уровня постановки научной задачи, отличающихся степенью детализации описания предмета исследования [3]:

- общая или содержательная постановка научной задачи – содержит вербальное описание целей исследования и его существенных свойств, подлежащих улучшению в результате решения задачи;

- абстрактная математическая постановка научной задачи – содержит свойственные ей атрибуты и использует обобщенное представление цели исследования, изучаемых закономерностей и метода решения задачи;

- предметная математическая постановка научной задачи – содержит подробное математическое описание используемых при решении задачи переменных в функциональных зависимостях и критериев достижения цели исследования.

Постановка научной задачи проводится на основе исходных данных об объекте исследования и достигнутых результатах в предметной области исследований. При этом общая постановка научной задачи является вербальной и излагается на обычном литературном языке, а абстрактная и предметная постановки научной задачи являются формализованными и представляются с использованием математической символики. Так, при абстрактной математической постановке научной задачи, как правило, используются системные показатели и теоретико-множественное представление задачи и условий достижения цели исследования, а при предметной математической постановке задачи используются частные показатели, связанные с целью исследования и их зависимости от параметров, характеризующих учитываемые внешние и внутренние факторы.

В завершенной диссертации по отрасли технических наук общая научная задача, как правило, излагается дважды: на содержательном уровне (при обосновании актуальности и выборе направления исследований) и на уровне формализованной математической постановки (при постановке конкретных задач исследования). При этом представление формализованной математической постановки задачи характеризует научный уровень соискателя, его способность интегрально представить научную задачу в виде ожидаемого результата улучшения того или иного показателя (системы показателей) объекта исследования в соответствии с целью исследований при принятых ограничениях.

Для диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук может быть рекомендована абстрактная математическая постановка научной задачи, отражающая основные аспекты научной проблемы, решаемой в диссертации, методы (методологию) ее решения и системный показатель или совокупность показателей достижения цели исследования. Для диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук может быть рекомендована предметная математическая постановка научной задачи, отражающая задачу, решаемую в диссертации, и конкретный технический показатель достижения цели исследования.

2. Повышение эффективности функционирования объекта исследования как основа формализованной постановки научной задачи диссертации

Формулировка научной задачи исследования осуществляется на основании цели исследований с использованием понятий из предмета исследований и терминологии привлекаемого математического аппарата. В соответствии с критерием практической значимости цель любой диссертации по отрасли технических наук можно рассматривать как повышение эффективности процесса функционирования объекта исследования в том или ином ее проявлении, а используемые при формализованной математической постановке научной задачи обобщенные и частные показатели – как показатели эффективности функционирования объекта исследования при его применении по назначению. Поэтому общий подход

к постановке научной задачи исследований в диссертации может быть сформулирован в терминах теории эффективности целенаправленных процессов [4-7]⁵.

Эффективность является общим свойством любых целенаправленных процессов, которое раскрывается через понятие цели и объективно выражается степенью достижения этой цели. Эффективность технической системы является характеристикой результативности выходного эффекта ее целенаправленного функционирования при применении по назначению. Показатели эффективности, определяемой таким образом, измеряются в единицах физических величин или в вероятностной мере. Эффективность технической системы также может быть определена как характеристика степени ее соответствия своему целевому назначению. При более подробном рассмотрении вопроса о целевых показателях функционирования технических систем учитывается соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами, что приводит к понятию технико-экономической эффективности. Технико-экономическая эффективность занимает промежуточное положение между технической и экономической эффективностью и имеет комплексный характер, ее показатели объединяют параметры, измеряемые в единицах физических величин и в денежных единицах.

При оценке эффективности технических систем обычно рассматривается несколько вариантов решения поставленных задач. В случае диссертационного исследования предлагаемый в диссертации вариант построения технической системы, являющейся объектом исследования, подлежит сравнению с существующими и альтернативными вариантами. Для выбора наиболее эффективного варианта построения технической системы необходим выбор показателей, по которым они будут сравниваться, и критерия, с помощью которого определяется предпочтительность того или иного решения. Показатели и критерии эффективности, используемые для оценки альтернативных вариантов построения технической системы, должны удовлетворять таким требованиям, как соответствие цели, содержательность, полнота, измеримость и другие [4; 5]. Так, требование соответствия показателя цели означает полноценное отображение с его помощью степени достижения цели функционирования технической системы, а требование измеримости показателя означает возможность измерения (оценки) его значения в некоторой шкале.

Правильный выбор системы показателей и критериев эффективности имеет большое значение в теории и практике. При анализе эффективности сложных технических систем в настоящее время находят применение различные технические, экономические и технико-экономические показатели, выбор которых и используемые критерии в значительной степени зависят от типа системы и условий ее применения по назначению [6; 8]. При выборе технических показателей эффективности приоритет отдается тем из них, которые обладают полнотой и достоверностью отображения исследуемых свойств технической системы, чувствительностью к основным ее параметрам, устойчивостью к возмущениям и вариациям исходных данных. Для совместного учета нескольких существенных характеристик технических систем вводят обобщенные (интегральные) показатели и системы показателей.

Использование только технических показателей, как частных, так и обобщенных, приводит к оценке эффективности технической системы без учета ресурсов, затраченных на ее создание. В то же время необходимость создания любой технической системы определяется также исходя из экономических факторов, в более общем случае – исходя из ресурсоемкости технической системы, включающей затраты на ее создание и применение [8]. Поэтому наряду с техническими показателями эффективности технических систем используются стоимостные показатели, характеризующие экономическую эффективность⁶. Они хорошо изучены, имеют многолетнюю историю применения. Благодаря своим свойствам стоимость в ряде случаев может выступать как комплексный показатель эффективности, поскольку он является монотонной функцией от любого частного технического показателя эффективности.

⁵ См. также: Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие. М.: Логос, 2003. – 736 с.

⁶ Кремер Н.Ш., Путко Б.А., Тришин И.М., Фридман М.Н. Исследование операций в экономике: учеб. пособие. М.: ЮНИТИ, 2002. – 407 с.

В то же время в общем случае экономические показатели непосредственно не учитывают технических характеристик анализируемой технической системы. В некотором смысле можно считать, что ресурсы вкладываются в создаваемые технические системы для обеспечения их эффективности, и рационально затраченные ресурсы всегда должны принести соответствующую отдачу в форме эффективности. В результате стоимость становится косвенной характеристикой эффективности. В другом предельном случае минимум стоимости имеет место при отсутствии затрат, при этом никакое изделие вообще не будет создано.

Цель функционирования любой технической системы наиболее полно задается в виде результата ее применения по назначению, который описывается как требуемый полезный эффект, требуемые затраты ресурсов и требуемые затраты времени. Процесс применения технической системы по назначению рассматривается как некоторая операция, а эффективность – как характеристика целевого предназначения технической системы, в общем случае оценивается тремя основными свойствами – результативностью, ресурсоемкостью и оперативностью, называемыми операционными свойствами [4; 5].

Результативность характеризует реально достижимый целевой эффект при применении технической системы по предназначению. Ресурсоемкость характеризует реальные затраты ресурсов для достижения целевого эффекта при применении технической системы по назначению. Оперативность характеризует свойство процесса применения технической системы по назначению во времени и отражает ее способность достижения целевого эффекта за определенное время. Обозначим операционные свойства технической системы в виде: $Y_{[n1]}(s, W)$ – результативность, $R_{[n2]}(s, W)$ – ресурсоемкость, $T_{[n3]}(s, W)$ – оперативность, где $n1, n2, n3$ – размерности векторов показателей Y, R, T соответственно.

Показатели $Y_{[n1]}(s, W), R_{[n2]}(s, W), T_{[n3]}(s, W)$ являются функциями от стратегии (s) применения технической системы и от множества (W) внешних и внутренних факторов, влияющих на результат ее применения. При этом под стратегией s понимаются действия или решения, направленные на достижение цели применения технической системы, а под множеством факторов W понимается множество m характеристик $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)$, используемых при оценивании операционных свойств технической системы. В качестве учитываемых факторов, образующих множество W , могут выступать: множество характеристик цели применения технической системы, множество технических характеристик технической системы, множество характеристик внешних факторов (условий), влияющих на результат применения технической системы, множество характеристик внутренних факторов, влияющих на результат применения технической системы и другие.

С учетом перечисленных операционных свойств эффективность применения технической системы по назначению может быть всесторонне оценена векторным показателем эффективности $\Xi_{[n]}(s, W)$ размерности n следующим образом:

$$\Xi_{[n]}(s, W) = [Y_{[n1]}(s, W), R_{[n2]}(s, W), T_{[n3]}(s, W)]. \quad (1)$$

Выражение (1) дает наиболее общий подход к определению эффективности применения широкого класса технических систем в рамках теории эффективности целенаправленных процессов [4].

Однако, оценивание эффективности технической системы векторным показателем (1) и формулировка предъявляемых к нему критериев являются довольно сложной задачей многокритериальной оптимизации по причине того, что показатели результативности, ресурсоемкости и оперативности часто противоречат друг другу и не всегда связаны функциональными зависимостями. Кроме того, корректное задание и определение показателей результативности, ресурсоемкости и оперативности при разработке новых технических решений для объектов исследования не всегда оказывается возможно. Это относится в том числе к объектам исследования, являющимся средствами вооружения и военной техники. Так, их ресурсоемкость, характеризуемая стоимостью создания, может быть достаточно высокой, однако при высокой результативности применения высоким будет и предотвращенный ущерб при обеспечении обороноспособности страны. Оперативность применения сложных

технических систем в ряде случаев определяется заранее установленными режимами и циклограммами, в этих условиях повышение оперативности не ведет к повышению целевого эффекта их применения по назначению.

Поэтому на практике для оценивания эффективности применения сложных технических систем, как правило, используют один показатель, а для остальных вводят ограничения. При этом в качестве основного показателя используют операционное свойство, отражающее цель исследования. В диссертациях по отрасли технических наук целью исследования, как правило, является повышение результативности применения технической системы, являющейся объектом исследования, по назначению. Поэтому эффективность технической системы определяется результативностью ее применения по назначению в виде:

$$\mathcal{E}_{[n1]}(s, W) = Y_{[n1]}(s, W) \text{ при } R_{[n2]}(s, W) \leq R_{[n2]}^{\text{зад}}, T_{[n3]}(s, W) \leq T_{[n3]}^{\text{зад}}, \quad (2)$$

где $R_{[n2]}^{\text{зад}}, T_{[n3]}^{\text{зад}}$ – заданные допустимые значения показателей ресурсоемкости и оперативности соответственно.

При переходе от векторных показателей $Y_{[n1]}(s, W), R_{[n2]}(s, W), T_{[n3]}(s, W)$ к скалярным показателям результативность характеризуется некоторым частным или обобщенным показателем Y , отражающим технические или эксплуатационные свойства технической системы, ресурсоемкость характеризуется некоторым показателем R , отражающим затраты ресурсов, оперативность характеризуется показателем времени T . В случае скалярных показателей Y, R, T эффективность технической системы \mathcal{E} также может определена в скалярном виде и аналогично выражению (2) характеризоваться ее скалярным показателем результативности в виде $\mathcal{E} = Y$ с заданием ограничений на показатели R и T . Кроме того, в данном случае могут использоваться удельные показатели Y/R и Y/T , характеризующие затраты ресурсов и времени на повышение результативности применения технической системы по назначению. Если показатель затрат ресурсов R имеет стоимостное выражение, то удельный показатель Y/R является технико-экономическим показателем эффективности.

Технико-экономические показатели эффективности вида Y/R получают распространение при анализе процессов создания и испытаний сложных технических систем [6]. При использовании таких показателей следует иметь в виду, что стоимость может существенным образом влиять на удельный показатель эффективности вида Y/R . Так, при нулевых затраченных ресурсах анализируемый показатель стремится к бесконечности, хотя никакого повышения результативности не происходит, а при увеличении объема затраченных ресурсов анализируемый показатель уменьшается, хотя при правильном использовании ресурсов результативность, очевидно, повышается. Поэтому необходимо введение ограничений на оба учитываемых показателя – и на результативность, и на ресурсоемкость.

В общем случае, при векторных показателях эффективности и ее составляющих, степень приближения результатов функционирования технической системы требуемым значениям количественно характеризует некоторая вектор-функция $g_{[n]}(s, W)$ ⁷, зависящая от разницы между полученным в результате разработки новых технических решений значением показателя эффективности $\mathcal{E}_{[n]}(s, W)$ и его требуемым значением $\mathcal{E}_{[n]}^{\text{ТР}}$. Выражается это следующим образом:

$$g_{[n]}(s, W) = \rho \left[\mathcal{E}_{[n]}(s, W), \mathcal{E}_{[n]}^{\text{ТР}} \right], \quad (3)$$

где $\rho(\cdot)$ – оператор, определяющий порядок сравнения векторных показателей эффективности $\mathcal{E}_{[n]}(s, W)$ и $\mathcal{E}_{[n]}^{\text{ТР}}$.

Значение вектора-функции $g_{[n]}(s, W)$ является основой для формирования критерия эффективности функционирования технической системы, позволяющее определить условия, при котором она удовлетворяет заданным требованиям. Для сравнительной оценки

⁷ Минаков Е.П., Шалдаев С.Е., Тарасов А.Г., Александров М.А. Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения: практикум. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 114 с.

эффективности используются два основных критерия – пригодности и оптимальности, которые выбираются с учетом вида вектора функции и цели исследования⁸. Критерий оптимальности используется в тех случаях, когда целью исследования является улучшение характеристик (повышение эффективности ее функционирования) технической системы, являющейся объектом исследования. Критерий пригодности используется в тех случаях, когда целью исследования является обеспечение требуемых характеристик (требуемых показателей эффективности) технической системы, являющейся объектом исследования.

Критерий пригодности:

$$Q: [g_{[n]}(s, W) \in G] = U, \quad (4)$$

где G – множество требуемых значений вектора-функции $g_{[n]}(s, W)$, U – символ достоверного события (истинное высказывание). Множество G представляет собой n -мерный вектор, задаваемый ограничениями на компоненты вектора-функции $g_{[n]}(s, W)$: $g_{нi} \leq g_i(s, W) \leq g_{вi}$, $i = 1, 2, \dots, n$, где $g_{нi}$, $g_{вi}$ – нижнее и верхнее ограничение на i -ю составляющую $g_i(s, W)$ вектора-функции $g_{[n]}(s, W)$.

Критерий пригодности позволяет найти одно или несколько возможных решений $g_{[n]}(s, W)$, обеспечивающих требуемую эффективность. Он применяется в тех случаях, когда целью исследования является определение диапазона возможных рациональных (пригодных) решений, удовлетворяющих ограничениям, заданным в виде множества G .

Если множество W внешних и внутренних факторов, влияющих на результат применения технической системы, изменяется во времени, то критерий пригодности может быть преобразован в критерий адаптивности:

$$E: [g_{[n]}(s, W(t)) \in G(t)] = U, t \in [T_{н}, T_{к}], \quad (5)$$

где $W(t)$ – изменяющееся во времени t множество внешних и внутренних факторов, $G(t)$ – изменяющееся во времени t множество требуемых значений вектора-функции $g_{[n]}(s, W(t))$. Множества $W(t)$ и $G(t)$ формируются в n -мерном векторе и учитывают возможные изменения условий функционирования технической системы выполнения операции в течение некоторого интервала времени t от начального $T_{н}$ до конечного $T_{к}$ значения.

Критерий адаптивности применяется, когда необходимо получить диапазон возможных решений $g_{[n]}(s, W(t))$ для условий функционирования технической системы, изменяющихся во времени t .

Критерий оптимальности:

$$K: \{g_{[n]}^*(s, W) = \text{extr}[g_{[n]}(s, W)]\} = U, \quad (6)$$

где $\text{extr}(\cdot)$ – оператор, определяющий условия достижения экстремальных (минимальных или максимальных) значений вектора-функции $g_{[n]}^*(s, W)$. Характер искомого экстремума (минимума или максимума) определяется типом показателя эффективности (результативности), выбранного с учетом цели и предмета исследований. В одних случаях максимальной эффективности соответствует максимум вектора-функции, связанной с выбранным показателем эффективности, в других случаях – ее минимумом.

Критерий оптимальности применяется, когда целью исследования является повышение эффективности (улучшение технических или эксплуатационных свойств) технической системы. В результате необходимо получить одно оптимальное (наилучшее) решение $g_{[n]}^*(s, W)$ из всех возможных и удовлетворяющее заданным ограничениям. Решение считается оптимальным, если оно обеспечивает максимальную эффективность. При этом, как

⁸ Минаков Е.П., Шалдаев С.Е., Тарасов А.Г., Александров М.А. ... Указ. соч.

правило, принимается во внимание соотношение между эффективностью, максимально достижимой в рассматриваемых условиях, и требуемой эффективностью.

Рассмотренные показатели и критерии представляют собой обобщенную форму для оценивания результатов применения технической системы с учетом предлагаемых новых технических решений в ходе проведения исследования. Они упрощаются при переходе от векторных к скалярным показателям эффективности, однако существо определения рациональных или оптимальных решений поставленной научной задачи при этом сохраняется. Однако на практике, в каждом конкретном случае, форма представления показателей и критериев эффективности будет зависеть от цели исследования, вида показателя, взаимных связей факторов, влияющих на условия применения технической системы, характера изменения переменных в функциональной зависимости показателя эффективности и характеристик технической системы. Далее представляются различные варианты постановки задачи исследования с применением рассмотренных обобщенных форм показателей и критериев эффективности технических систем.

3. Примеры формализованной постановки научной задачи диссертации

Постановка задачи исследования должна включать описание исходных данных, вербальную и математическую постановку задачи. Это соответствует общепринятому подходу к формализованной постановке задачи исследования, сформулированному в работах [3; 6; 9], в которых рассматриваются методические аспекты постановки задачи исследования в диссертационных и научно-исследовательских работах⁹.

При формализованной постановке задачи исследования в диссертации по отрасли технических наук исходные данные в общем случае включают:

- исходные данные о технической системе, являющейся объектом исследования, не изменяемые в ходе исследования (состав, структура, количество элементов, описание взаимодействия элементов в процессе функционирования, условий применения технической системы);
- вектор внутренних характеристик технической системы и её элементов (производительность, пропускная способность, стоимость, надежность);
- вектор внешних факторов, характеризующих условия функционирования технической системы (взаимодействующие внешние элементы, входной и выходной потоки информации, характеристики деструктивных воздействий);
- вектор варьируемых внутренних и внешних параметров, влияющих на результат функционирования технической системы (параметры технических и эксплуатационных характеристик технической системы, параметры внешних факторов).

В постановке задачи (вербальной и математической) определяются:

- показатель эффективности, связанный с целью функционирования технической системы;
- функциональная зависимость показателя эффективности от исходных данных;
- критерий достижения цели функционирования технической системы;
- ограничения при функционировании технической системы.

Для сложных технических систем в диссертации в рамках принятых ограничений могут рассматриваться отдельные режимы их функционирования или выполняемые операции. С учетом формального описания исходных данных, выбранного показателя эффективности и в зависимости от формулировки цели операции могут быть выполнены вербальная и математическая постановка задачи по критерию оптимальности и по критерию пригодности.

Далее приведены примеры постановки задачи для трех наиболее характерных направлений исследования в диссертациях военно-прикладных задач. Первый пример характерен для задачи выбора наиболее предпочтительного варианта построения технической системы, второй вариант – для задачи выбора наилучших технических решений в рамках заданной структуры технической системы, третий вариант – для задачи, в которой используется комплексный технико-экономический показатель эффективности.

⁹ См. также: Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации: учеб. пособие. Томск: ТПУ, 2013. – 134 с.

Пример 1

В качестве технической системы, являющейся объектом исследования, рассматривается информационно-управляющая система (ИУС), представляющая собой совокупность пунктов управления (ПУ), оснащенных вычислительными средствами для обработки информации, объединенных каналами передачи данных и функционирующая в условиях воздействия деструктивных факторов.

Описание исходных данных. Структура ИУС задана ориентированным графом $G(V, E)$, где $V = \{v_i\}$ множество узлов $i = 1, 2, \dots, I$, соответствующих ПУ, а E – множество дуг, определяемое единичными элементами матрицы связности $\{e_{ij}\}_{I \times I}$, где $e_{ij} = 1$ в случае наличия канала связи из i -го в j -й ПУ и $e_{ij} = 0$ – в противном случае. Задан вектор характеристик вычислительных средств для каждого ПУ Ω_i , включающий быстродействие, объем памяти, пропускную способность, уровень защищенности от деструктивных воздействий. Задан вектор характеристик входного потока заявок B , включающий тип заявок b_q , $q = 1, 2, \dots, Q$, определяющий ее приоритет и объем вычислений. Обработка информации в ИУС происходит в циклическом режиме за время, не превышающее время цикла ($T_{ц}$) работы ИУС. В процессе функционирования на вычислительные устройства воздействуют деструктивные факторы с заданным вектором характеристик F , включающим тип воздействия f_l , $l = 1, 2, \dots, L$, его длительность и уровень ущерба. В результате воздействия деструктивных факторов на вычислительные средства происходит снижение эффективности функционирования ИУС.

Для обеспечения защищенности вычислительных средств ПУ от воздействия деструктивных факторов имеется множество средств защиты $M = \{g\}$, каждое из которых характеризуется типом защиты $g = 1, 2, \dots, G$ и вектором характеристик Z_g . На i -м ПУ могут применяться разнотипные средства защиты, в том числе несколько средств защиты одного типа. Количество средств защиты g -го типа на i -м ПУ составляет m_{ig} . Тогда комплекс защиты всей ИУС можно представить в виде матрицы $M_{ig} = \{m_{ig}\}_{I \times G}$. Применение на ПУ средства защиты g -го типа требует затрат ресурсов C_g . За счет применения средств защиты на всех ПУ происходит прирост показателя эффективности функционирования ИУС в целом. Суммарная стоимость комплекса средств защиты ИУС составляет:

$$C_{\Sigma}(M_{ig}) = \sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G m_{ig} C_g.$$

Поскольку целевым назначением ИУС является обработка информации, в качестве показателя эффективности (результативности) функционирования ИУС в данном случае может быть использована вероятность $P_{обр}$ обработки всех типов заявок в ИУС в условиях воздействия деструктивных факторов. Как функция от параметров исходных данных она определяется следующим образом:

$$P_{обр} = P_{обр}[G(V, E), \Omega_i, B, F, M_{ig}, Z_g], \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, I.$$

От этих же параметров исходных данных в общем случае зависит и время цикла обработки всех типов заявок в ИУС:

$$M_{ig}^* = \operatorname{argmax} P_{обр}[G(V, E), \Omega_i, B, F, M_{ig}, Z_g].$$

Вербальная постановка задачи по критерию оптимальности формулируется следующим образом: требуется определить состав комплекса средств защиты M_{ig}^* , обеспечивающий максимальную вероятность $P_{обр}$ обработки всех типов заявок в ИУС в условиях воздействия деструктивных факторов F за время, не превышающее $T_{ц}^{max}$, и не превышающий допустимую стоимость $C_{доп}$.

Математическая постановка задачи по критерию оптимальности выглядит следующим образом:

$$M_{ig}^* = \operatorname{argmax} P_{обр}[G(V, E), \Omega_i, B, F, M_{ig}, Z_g], \quad g \in M, \quad i, j = 1, \dots, I, \quad (7)$$

при ограничениях $T_{ц} \leq T_{ц}^{max}$, $C_{\Sigma} \leq C_{доп}$.

При использовании критерия оптимальности решением задачи является выбор состава комплекса средств защиты M_{ig}^* , обеспечивающего максимальное значение вероятности $P_{обр}$ обработки всех типов заявок в ИУС в условиях воздействия деструктивных факторов. При использовании данного критерия решение является единственным – выбирается наилучший состав комплекса средств защиты M_{ig}^* , соответствующий условию (7).

Вербальная постановка задачи по критерию пригодности формулируется следующим образом: требуется определить состав комплекса средств защиты M_{ig}^* , обеспечивающий требуемую вероятность $P_{обр}^{тр}$ обработки всех типов заявок в ИУС в условиях воздействия деструктивных факторов F за время, не превышающее $T_{ц}^{max}$, и не превышающий допустимую стоимость $C_{доп}$.

Математическая постановка задачи по критерию пригодности выглядит следующим образом:

$$M_{ig}^* = P_{обр} [G(V, E), \Omega_i, B, F, M_{ig}, Z_g] \geq P_{обр}^{тр}, \quad g \in M, \quad i, j = 1, \dots, I, \quad (8)$$

при ограничениях $T_{ц} \leq T_{ц}^{max}$, $C_{\Sigma} \leq C_{доп}$.

При использовании критерия пригодности решением задачи является выбор варианта состава комплекса средств защиты M_{ig}^* , обеспечивающего требуемое значение вероятности $P_{обр}$ обработки всех типов заявок в ИУС в условиях воздействия деструктивных факторов. При использовании данного критерия решение не является единственным и может быть выбран вариант состава комплекса средств защиты из подмножества допустимых вариантов $\{M_{ig}^*\}$, удовлетворяющих условию (8).

Пример 2

В качестве объекта исследования рассматривается радиолокационная станция (РЛС), предназначенная для обнаружения целей в условиях воздействия помех. В процессе функционирования РЛС в зависимости от параметров действующих помех происходит алгоритмическая адаптация обработки принимаемых сигналов к условиям приема с целью увеличения вероятности обнаружения цели.

Описание исходных данных. РЛС задана вектором параметров ее технических характеристик B , включающим ширину спектра радиолокационного сигнала, чувствительность приемника, среднюю мощность излучения, форму и ширину диаграммы направленности, разрешающую способность. Действующие помехи задаются вектором параметров помехи Π , включающим тип помехи, мощность помехи, частоту излучения помехи, ширину спектра помехи. Задан вектор характеристик обнаруживаемых целей S , включающий тип цели, дальность, угловые координаты, эффективную отражающую поверхность, скорость движения цели.

В процессе функционирования РЛС в зависимости от параметров действующих помех в процессе обработки радиолокационной информации используются алгоритмы адаптации A_1, A_2, \dots, A_n , образующие множество A . Каждый i -й алгоритм адаптации A_i характеризуется набором параметров I_i , $i = 1, 2, \dots, n$, где n – общее число допустимых алгоритмов адаптации. Основным условием при выборе того или иного алгоритма адаптации является обеспечение требуемой величины вероятности обнаружения цели $P_{обн}$ при условии допустимого значения вероятности ложной тревоги $P_{лт}$: $P_{лт} \leq P_{лт}^{зад}$, где $P_{лт}^{зад}$ – заданная максимально допустимая вероятность ложной тревоги.

В качестве показателя эффективности (результативности) функционирования РЛС в данном случае выступает вероятность обнаружения цели $P_{обн}$ в условиях воздействия помех. Как функция от параметров исходных данных при использовании i -го алгоритма адаптации она определяется следующим образом:

$$P_{обн} = P_{обн}[B, \Pi, S, A_i(I_i), P_{лт}].$$

В данной зависимости учитывается характерная для радиолокационного обнаружения целей взаимосвязь характеристик обнаружения – вероятностей обнаружения $P_{обн}$ и ложной тревоги $P_{лт}$. При этом вероятность ложной тревоги $P_{лт}$ сама является функцией от параметров исходных данных: $P_{лт} = P_{лт}[B, \Pi, A_i(I_i)]$.

Практически исходное значение $P_{лт}$ задается первоначально, а после выбора алгоритма адаптации, обеспечивающего максимум или заданную величину вероятности обнаружения цели $P_{обн}$, рассчитывается достижимая при его использовании вероятность ложной тревоги $P_{лт}$ и проверяется выполнение условия $P_{лт} \leq P_{лт}^{зад}$. Если условие не выполняется, то выбор алгоритма адаптации повторяется, и решением задачи является выбор алгоритма, отвечающий, как требованию обеспечения максимума или заданной величины вероятности обнаружения цели $P_{обн}$, так и требованию по допустимому значению вероятности ложной тревоги $P_{лт}$. Поэтому независимо от используемого критерия процесс решения задачи может быть итерационным.

Вербальная постановка задачи по критерию оптимальности формулируется следующим образом: при заданных параметрах характеристик РЛС B , параметров помехи Π и параметров целей S необходимо выбрать из множества алгоритмов адаптации A алгоритм A_i , позволяющий максимизировать в условиях воздействия помех вероятность обнаружения цели $P_{обн}$ при условии обеспечения заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}^{зад}$.

Математическая постановка задачи по критерию оптимальности выглядит следующим образом:

$$A_i(I_i^*): I_i^* = \operatorname{argmax} P_{обн}[B, \Pi, S, A_i(I_i), P_{лт}], \quad A_i \in A, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

при ограничении $P_{лт}[B, \Pi, A_i(I_i)] \leq P_{лт}^{зад}$.

При использовании критерия оптимальности решением задачи является выбор из множества алгоритмов адаптации A алгоритма A_i , характеризуемого набором параметров I_i , который обеспечивает максимальное значение вероятности обнаружения цели $P_{обн}$ в условиях воздействия помех. При использовании данного критерия решение является единственным – выбирается наилучший алгоритм, соответствующий условию (9).

Вербальная постановка задачи по критерию пригодности формулируется следующим образом: при заданных параметрах характеристик РЛС B , параметров помехи Π и параметров целей S необходимо выбрать из множества алгоритмов адаптации A алгоритмы A_i , обеспечивающие в условиях воздействия помех требуемое значение вероятности обнаружения цели $P_{обн}^{тp}$ при условии обеспечения заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}^{зад}$.

Математическая постановка задачи по критерию пригодности выглядит следующим образом:

$$\{A_i(I_i^*)\}: P_{обн}[B, \Pi, S, A_i(I_i), P_{лт}] \geq P_{обн}^{тp}, \quad A_i \in A, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

при ограничении $P_{лт}[B, \Pi, A_i(I_i)] \leq P_{лт}^{зад}$.

При использовании критерия пригодности решением задачи является выбор из множества алгоритмов адаптации A нескольких вариантов алгоритмов A_i , характеризуемых наборами параметров I_i , которые обеспечивают требуемое значение вероятности обнаружения цели $P_{обн}^{тp}$ в условиях воздействия помех. При использовании данного критерия решение не является единственным, и из множества алгоритмов адаптации A может быть выбран один из алгоритмов из подмножества допустимых алгоритмов $\{A_i(I_i^*)\}$, удовлетворяющих условию (10).

Пример 3

В качестве технической системы, являющейся объектом исследования, рассматривается комплекс средств вооружения (СВ), предназначенный для поражения целей. Для его создания предлагается несколько вариантов построения комплекса с заданными характеристиками. Необходимо выбрать вариант создания комплекса на основании сравнительной оценки предлагаемых вариантов по технико-экономическому показателю.

Описание исходных данных. Разработка комплекса СВ может проводиться в нескольких возможных вариантах V_1, V_2, \dots, V_I , образующих множество V . Каждый i -й вариант создания комплекса V_i характеризуется вектором характеристик B_i , $i = 1, 2, \dots, I$, где I – общее число допустимых вариантов. Вектор характеристик B_i комплекса включает: минимальную и максимальную дальности поражения D_i^{min}, D_i^{max} , границы зоны действия комплекса по азимуту и углу места $\varphi_i^{min}, \varphi_i^{max}, \theta_i^{min}, \theta_i^{max}$, скорострельность v_i , среднеквадратические ошибки попадания в цель по дальности, азимуту и углу места $\sigma_i^D, \sigma_i^\varphi, \sigma_i^\theta$. Задано ожидаемое количество целей в ударе (налёте) $M_{ож}$ и общее время удара (налёта) $T_{нал}$. Цели могут быть различного типа, общее число типов целей составляет J . Распределение целей в ударе (налёте) по типам задается коэффициентами k_j , $j = 1, 2, \dots, J$, удовлетворяющими условию $\sum_{j=1}^J k_j = 1$. В этом случае число целей j -го типа m_j в ударе (налёте) составляет $m_j = k_j M_{ож}$. Характеристики цели j -го типа заданы вектором R_j , который может включать дальность, угловые координаты, эффективную отражающую поверхность, скорость движения цели и другие параметры.

В процессе применения комплекса в каждом варианте его создания имеется возможность поражения целей всех типов. Вероятность поражения P_{ij} одним выстрелом i -го комплекса по цели j -го типа будет определяться характеристиками комплекса B_i и характеристиками цели R_j : $P_{ij} = f(B_i, R_j)$, $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$. В зависимости от характеристик комплекса (скорострельности, размеров зоны обзора) и цели (скорости и высоты полета) и продолжительности удара (налёта) одна и та же цель может быть обстреляна комплексом один или несколько раз. Вероятность поражения i -м комплексом цели j -го типа определяется выражением:

$$P_{ij}(l_{ij}) = 1 - (1 - P_{ij})^{l_{ij}},$$

где l_{ij} – среднее количество выстрелов i -м комплексом по цели j -го типа за время удара (налёта). Величина l_{ij} может быть определена в виде $l_{ij} = n_{ij}/m_j$, где n_{ij} – количество выстрелов i -м комплексом по всем целям j -го типа за время удара (налёта). Величина n_{ij} , в свою очередь, может быть определена в виде $n_{ij} = k_j n_i$, где n_i – количество выстрелов i -м комплексом по всем целям всех типов за время удара (налёта), $n_i = T_{нал}/v_i$.

Учитывая целевое назначение комплекса СВ, показателем результативности его применения может быть выбрано математическое ожидание числа пораженных i -м комплексом целей M_i за время удара (налёта), при условии, что за время налета комплекс СВ успевает обстрелять минимальное заданное число целей M_{min} . Величина M_i определяется выражением:

$$M_i = \sum_{j=1}^J (1 - (1 - P_{ij})^{l_{ij}}) m_j,$$

при выполнении условия $n_i \geq M_{min}$ или, что то же самое, $T_{нал}/v_i \geq M_{min}$.

В рассматриваемом случае целью исследования является определение варианта построения технической системы по критерию технико-экономической эффективности. Выбранный показатель результативности M_i входит в комплексный показатель технико-экономической эффективности, в качестве которого используется удельная стоимость поражения одной цели $C_i^{уд}$. При известных затратах на разработку i -го варианта комплекса $C_i^{раз}$ и стоимости одного выстрела $C_i^{выс}$ величина $C_i^{уд}$ определяется выражением $C_i^{уд} = (C_i^{раз} + C_i^{выс} n_i)/M_i$.

С учетом зависимости от исходных данных параметров n_i и M_i величина удельной стоимости поражения одной цели $C_i^{уд}$ для i -го варианта комплекса как функция от параметров исходных данных определяется следующим образом:

$$C_i^{уд} = C_i^{уд}(C_i^{раз}, C_i^{выс}, B_i, R_j, T_{нал}, M_{ож}).$$

Вербальная постановка задачи по критерию оптимальности формулируется следующим образом: требуется выбрать из множества вариантов построения комплекса СВ V вариант V_i с характеристиками B_i^* , обеспечивающий минимальное значение удельной стоимости поражения одной цели $C_i^{уд}$ при условии, что за время налета комплекс успевает обстрелять заданное минимальное число целей M_{min} .

Математическая постановка задачи по критерию оптимальности выглядит следующим образом:

$$V_i(B_i^*): B_i^* = \operatorname{argmin} C_i^{уд}(C_i^{раз}, C_i^{выс}, B_i, R_j, T_{нал}, M_{ож}), \quad V_i \in V, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (11)$$

при ограничении $n_i = T_{нал}/v_i \geq M_{min}$.

При использовании данного критерия решение является единственным – выбирается наилучший вариант построения комплекса V_i с характеристиками B_i^* , соответствующий условию (11), при выполнении ограничения по количеству выстрелов по всем целям за время удара (налёта).

Вербальная постановка задачи по критерию пригодности формулируется следующим образом: требуется выбрать из множества вариантов построения комплекса СВ V вариант V_i с характеристиками B_i^* , обеспечивающий требуемую удельную стоимость поражения одной цели $C_i^{уд} \leq C_{тр}^{уд}$ при условии, что за время налета комплекс успевает обстрелять заданное минимальное число целей M_{min} .

Математическая постановка задачи по критерию пригодности выглядит следующим образом:

$$\{V_i(B_i^*)\}: C_i^{уд}(C_i^{раз}, C_i^{выс}, B_i, R_j, T_{нал}, M_{ож}) \leq C_{тр}^{уд}, \quad V_i \in V, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (12)$$

при ограничении $T_{нал}/v_i \geq M_{min}$.

При использовании данного критерия решение не является единственным, и может быть выбран один из вариантов построения комплекса СВ (V_i с характеристиками B_i^*) из подмножества допустимых вариантов с характеристиками $\{V_i(B_i^*)\}$, удовлетворяющих условию (12).

Заключение

Наличие формализованной постановки научной задачи исследования, которая решается в диссертации, является одним из важных требований к диссертациям по военнотехническим специальностям. Четкая постановка научной задачи характеризует как уровень достигнутых при ее решении результатов диссертации, так и научную квалификацию автора диссертации – соискателя ученой степени.

Рассмотренный в статье подход в постановке задачи и ее формализации основан на использовании основных понятий теории эффективности целенаправленных процессов и теории исследования операций. Эффективность функционирования технической системы, являющаяся объектом исследования в диссертации, рассматривается как характеристика ее целевого предназначения и в общем случае характеризуется тремя основными свойствами – результативностью, ресурсоемкостью и оперативностью. При решении конкретных задач диссертационных исследований по отрасли технических наук цель исследований в большинстве случаев состоит в улучшении или достижении заданного уровня одного из этих свойств, чаще всего результативности, а другие свойства учитываются в ограничениях.

Приведены обобщенные формы критериев эффективности технических систем с учетом указанных свойств при использовании критериев пригодности и оптимальности, а также примеры постановки задачи для наиболее характерных направлений исследования военно-прикладных задач.

Авторы статьи сделали попытку систематизировать опыт в постановке научных задач исследования, накопленный в результате научного руководства соискателями и работы в диссертационных советах, и сформулировать общие рекомендации для соискателей. При этом постановка задачи исследования, несомненно, является творческим процессом и требует от соискателей ученых степеней и их руководителей (консультантов) всестороннего изучения рассматриваемой предметной области, ее особенностей и специфики применения объекта исследования по назначению.

Список использованных источников

1. Рахманов А.А., Кулешов Ю.В., Ломако А.Г., Мальцев Г.Н. Современные проблемы подготовки научных кадров высшей квалификации по специальностям военные науки направления её совершенствования // Вооружение и экономика. 2019. №2(48). – С. 59-82.
2. Буренок В.М., Дурнев Р.А. Рассуждение о диссертации: введение в полемику // Вооружение и экономика. 2020. №1(51). – С. 79-84.
3. Тарасенко С.А. Формализованная методология исследования специальной техники. М.: Красная Звезда, 2017. – 368 с.
4. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1: Методология, методы, модели. Л.: МО СССР, 1989. – 660 с.
5. Ашимов А.А., Гейда А.С., Лысенко И.В., Юсупов Р.М. Эффективность функционирования и другие операционные свойства систем: задачи и метод оценивания // Труды СПИИРАН. 2018. Вып.60. – С. 241-270.
6. Боев С.Ф., Линкевичус А.П., Логовский А.С. и др. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения: монография. М.: Научная книга, 2019. – 424 с.
7. Ильичев А.А. Основы анализа эффективности и рисков целевых программ. М.: Научный мир, 2009. – 332 с.
8. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Оценка стоимостных показателей высокотехнологичной продукции. М.: Граница, 2012. – 423 с.
9. Стрэналюк Ю.В. Типовая формализованная постановка задачи исследования в диссертационной работе // Информационно-технологический вестник. 2016. №1(7). – С. 83-90.