

А.С. Логовский, кандидат физико-математических наук

Г.Н. Мальцев, доктор технических наук, профессор

А.А. Рахманов, доктор технических наук, профессор

А.В. Тимошенко, доктор технических наук, профессор

Технико-экономический показатель эффективности создания радиолокационных систем дальнего обнаружения

К настоящему времени создано несколько поколений отечественных радиолокационных станций дальнего обнаружения (РЛС ДО), и для всех созданных образцов характерно то, что в них реализованы технические характеристики и функциональные возможности по радиолокационному обнаружению объектов (целей), близкие к предельно достижимым на период их разработки. Создание РЛС ДО нового поколения требует высокого уровня организации их проектирования и производства, что обусловлено высокой сложностью как самого изделия, так и производственного процесса его создания. В качестве базового критерия эффективности при создании РЛС ДО нового поколения в ряде работ обоснован критерий минимума риска. В то же время с точки зрения управления процессами создания РЛС ДО на этапах проектирования и производства существует необходимость использования наряду с критерием минимума риска критериев технико-экономической эффективности создания РЛС ДО. В настоящей статье предложен новый комплексный показатель технико-экономической эффективности создания РЛС ДО, который позволяет реализовать единый подход к оценке вариантов построения создаваемой РЛС ДО и облегчить контроль и управление ее проектированием.

Введение

Радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО) являются важнейшими информационными средствами систем стратегического сдерживания – систем предупреждения о ракетном нападении, контроля космического пространства и противоракетной обороны [1, 2]. Характер решаемых задач и требования к функциональным возможностям РЛС ДО определяют их облик как сложных наукоемких изделий радиоэлектронной промышленности, воплощающих новейшие достижения в области информационных технологий радиоэлектронных систем.

К настоящему времени создано уже несколько поколений отечественных РЛС ДО, и для всех созданных образцов РЛС ДО характерно то, что в них реализованы технические характеристики и функциональные возможности по радиолокационному обнаружению объектов (целей), близкие к предельно достижимым на период их создания [3, 4]. В современных условиях совершенствование РЛС ДО связано с расширением их функциональных возможностей, повышением информативности, широким использованием современной элементной базы цифровой и вычислительной техники и реализацией сложных алгоритмов обработки радиолокационной информации и управления функционированием, что связано с выполнением требований к уровню решения стоящих перед ними задач.

Создание РЛС ДО нового поколения требует высокого уровня организации их проектирования и производства. Это обусловлено высокой сложностью как самого изделия (РЛС ДО), так и производственного процесса его создания, и приводит к необходимости принятия новых инновационных технологических решений конструирования аппаратно-программных комплексов РЛС ДО и организационных методов управления их созданием на всех этапах жизненного цикла. Процесс управления созданием РЛС ДО нового поколения должен основываться, с одной стороны, на актуальных и точных оценках эффективности создания как отдельных компонентов, так и РЛС в целом, с другой стороны, на математически обоснованных алгоритмах оптимального выбора состава и структуры РЛС ДО при ограничениях на общую стоимость и время ее создания.

В качестве базового критерия эффективности при создании РЛС ДО нового поколения в работах [4, 5] обоснован критерий минимума риска создания РЛС ДО как вероятности того, что РЛС ДО с требуемыми техническими характеристиками и функциональными возможностями не будет создана к заданному моменту времени при заданном объеме финансирования. Введенный таким образом показатель эффективности является вероятностным и учитывает технический уровень создаваемой РЛС ДО, а также финансовые и временные ограничения на реализацию проекта в виде исходных данных и ограничений. В то же время с точки зрения управления процессами создания РЛС ДО на этапах проектирования и производства существует необходимость использования наряду с критерием минимума риска критериев технико-экономической эффективности создания РЛС ДО при сохранении в ограничениях времени и риска реализации проекта.

В настоящей статье проанализированы подходы к анализу и оценке эффективности сложных технических систем и предложено использование нового комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО, основанного на определении стоимости единицы ее энергетического потенциала на объекте (радиолокационной цели) с учетом времени создания. Введенный показатель технико-экономической эффективности создания РЛС ДО позволяет реализовать единый подход к оценке вариантов построения создаваемой РЛС ДО, облегчить контроль и управление ее проектированием. Показано, что использование такого показателя хорошо согласуется с имеющейся практикой создания нескольких поколений РЛС ДО.

1. Анализ подходов к анализу и оценке эффективности сложных технических систем

В общем случае эффективность является характеристикой результативности выходного эффекта целевого функционирования технической системы [6, 7]. Эффективность также может быть определена как характеристика степени соответствия технической системы 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, ее показатели объединяют параметры, измеряемые в единицах физических величин и в денежной оценке.

При оценке эффективности сложных технических систем обычно рассматривается несколько вариантов решения поставленных задач. Это в полной мере относится и к созданию технических систем, являющихся средствами вооружения и военной техники. Для выбора наиболее эффективного варианта построения технической системы необходим критерий, с помощью которого определяется предпочтительность того или иного решения. При анализе эффективности создания сложных технических систем в настоящее время находят применение различные технические, экономические и технико-экономические показатели, выбор которых в значительной степени зависит от создаваемого изделия и условий реализации проекта [4, 8]. При организации

высокотехнологичного производственного процесса и выборе технических и технологических решений создания РЛС ДО формирование показателей и критериев эффективности создания РЛС ДО является исключительно важным этапом технико-экономического анализа.

В качестве технических показателей эффективности радиоэлектронных систем принимают, например, показатели помехоустойчивости, пропускную способность, надежность, готовность и комбинации различных технических параметров [9, 10]. Данные показатели являются локальными и характеризуют только качество системы, ее технический уровень. Соответствующие критерии эффективности связаны с оптимизацией и достижением наилучших значений выбранных технических показателей, например, максимальной помехоустойчивости. Однако использование только технических показателей 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 [6].

Особое место среди критериев эффективности занимают стоимостные критерии, используемые при анализе экономической эффективности [11]. 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 показателя эффективности. В некотором смысле можно считать, что труд вкладывается в создаваемые изделия для обеспечения их эффективности, и рационально затраченный труд всегда должен 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. В то же время в общем случае экономические показатели непосредственно не учитывают технических характеристик создаваемой технической системы.

Совместный учет как технической, так и экономической эффективности создания сложных технических систем возможен при использовании критериев эффективности на основе комплексных технико-экономических показателей. Используемый показатель является ключевым элементом любого критерия эффективности. При анализе сложных систем и процессов при отсутствии общего комплексного критерия эффективности в общем случае не представляется возможным оценить значение и относительную важность отдельных показателей эффективности и произвести их ранжирование. Поэтому стремление к отысканию общего или комплексного критерия эффективности при анализе сложных систем и процессов всегда актуально. В рассматриваемом случае анализа процессов создания РЛС ДО как сложных наукоемких технических систем вопросы использования частных показателей эффективности и формирования комплексного (интегрального) показателя эффективности и оказываются увязаны трансцендентно, что существенно усложняет решение задачи анализа эффективности создания РЛС ДО.

Чтобы правильно выбирать критерии оценки эффективности создания технической системы, необходимо сформулировать требования к интересующим оценкам эффективности, в частности, для чего они будут использоваться при анализе проектируемой технической системы или технологического процесса ее создания. Анализ указанных требований позволит в каждом конкретном случае сделать вывод о том, насколько адекватными являются те или иные показатели и критерии эффективности.

Для анализа эффективности создания РЛС ДО необходимы критерии, которые отражали бы наиболее существенные стороны процесса создания РЛС ДО, были бы чувствительны к динамике изменения факторов риска и адекватно интерпретировали механизмы воздействия на них.

При этом оптимизируемый показатель эффективности должен по смыслу (по содержанию) отражать способность РЛС ДО к достижению цели функционирования, т. е. количественно определять эффективность ее целевого применения, иметь понятный физический смысл, а также допускать возможность расчета (количественной оценки) по определенному набору исходных данных.

Требование комплексного технико-экономического подхода при выборе критериев эффективности обуславливает необходимость совместно учитывать технические, экономические и иные составляющие эффективности. Важнейшим условием формирования адекватных критериев технико-экономической эффективности следует считать сопоставление эффекта и затрат, требуемых для его получения. При оптимизации процесса создания сложной технической системы необходимо учитывать, как полезный эффект, так и затраты, необходимые для его достижения, хотя бы в виде ограничений.

В общем случае технические характеристики сложной технической системы, описываемые множеством $\{y\}$, являются функцией параметров внешних условий, характеризуемых множеством $\{z\}$: $y = f\{z\}$. Зависимость полезного эффекта \mathcal{E} , получаемого в результате использования технических решений, от указанных характеристик определяется зависимостью $\mathcal{E} = \xi(y)$, которую можно записать в виде $\mathcal{E} = \xi(f\{z\})$. Изменение технических характеристик обычно приводит к изменению затрат на создание и эксплуатацию системы. Зависимость между затратами \mathcal{Z} и техническими характеристиками описывается зависимостью $\mathcal{Z} = \varphi(y)$, которую можно записать в виде $\mathcal{Z} = \varphi(f\{z\})$. Исходя из указанных зависимостей осуществляется технико-экономический анализ сложных технических систем. В данном случае и полезный эффект \mathcal{E} , и затраты на его достижение \mathcal{Z} выражаются через параметры внешних условий z .

Таким образом, применение только технического или только стоимостного критерия эффективности создания сложных технических систем в большинстве случаев является недостаточным, поскольку по отдельности показатели \mathcal{E} и \mathcal{Z} не учитывают в полной мере все аспекты создания сложных наукоемких технических систем. Поэтому исходя из рассмотренных требований формулируются принципы, на основе которых могут формироваться критерии технико-экономической эффективности создания сложных технических системы, совместно учитывающие показатели \mathcal{E} и \mathcal{Z} . При этом в качестве технического показателя эффективности, как правило, используется значение той или иной технической характеристики системы, имеющей наиболее важное значение с точки зрения ее применения по назначению, а в качестве экономического показателя эффективности используется стоимость, с учетом всех ее составляющих, имеющих место при создании анализируемой системы.

В качестве базовых принципов анализа технико-экономической эффективности в большинстве случаев рассматриваются принцип минимума затрат и принцип максимума полезного эффекта, объединяемых в виде:

$$\mathcal{E}_{\max} = \max_{x \in X} \mathcal{E}(x) \Big|_{\mathcal{Z}(x) \in \mathcal{Z}'}; \quad \mathcal{Z}_{\min} = \min_{x \in X} \mathcal{Z}(x) \Big|_{\mathcal{E}(x) \in \mathcal{E}'}, \quad (1)$$

где x – вариант достижения цели из множества вариантов X , допустимых по условиям задачи;

$\mathcal{E}(x)$ и $\mathcal{Z}(x)$ – значения достижимого полезного эффекта \mathcal{E} и затрат \mathcal{Z} на достижение этого полезного эффекта для варианта x ;

\mathcal{E}' , \mathcal{Z}' – допустимые области изменения полезного эффекта \mathcal{E} и затрат \mathcal{Z} соответственно.

Принцип минимума затрат используют в тех случаях, когда при заданном полезном эффекте необходимо определить вариант, при котором обеспечиваются минимально возможные затраты. Если же при заданных затратах необходимо достичь максимальной полезный эффект, то применяют принцип максимума полезного эффекта. Однако такое разделение критерия технико-экономической эффективности (1) и независимое использование его составляющих при анализе

сложных систем и процессов затруднено, поскольку полезный эффект и затраты в общем случае характеризуются множеством составляющих, относящихся к различным группам взаимосвязанных экономических и технических показателей, и это приводит к необходимости использовать комплексные показатели технико-экономической эффективности, по сути, конструировать их с учетом специфики решаемой задачи.

В рамках рассматриваемой задачи анализа эффективности создания РЛС ДО для различных вариантов технических и технологических решений наибольший интерес представляют комплексные показатели технико-экономической эффективности. Это обусловлено сложностью самих РЛС ДО и производственного процесса их создания, что не позволяет независимо использовать составляющие критерия технико-экономической эффективности (1). При этом для выбора вида комплексного показателя технико-экономической эффективности необходимо провести анализ предметной области, включающий, во-первых, установление смысла и содержания величин \mathcal{E} и \mathcal{Z} применительно к процессу создания РЛС ДО; во-вторых, определение зависимостей величин \mathcal{E} и \mathcal{Z} от времени реализации проекта по созданию РЛС ДО; в-третьих, анализ зависимостей величин \mathcal{E} и \mathcal{Z} от степени достижения цели при последующем применении создаваемой РЛС ДО по назначению.

На практике находят широкое применение показатели вида \mathcal{E}/\mathcal{Z} и \mathcal{Z}/\mathcal{E} , где \mathcal{E} – технический эффект, \mathcal{Z} – затраты того или иного вида на достижение этого технического эффекта. Так, показатель вида \mathcal{E}/\mathcal{Z} используется при анализе эффективности испытаний сложных технических систем [12]. Этот же показатель может быть использован для сравнения эффективности двух техниче-

ских систем одинакового назначения с помощью соотношения $\frac{\mathcal{E}_1/\mathcal{Z}_1}{\mathcal{E}_2/\mathcal{Z}_2}$, где $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ – технический эффект использования сравниваемых технических систем по назначению; $\mathcal{Z}_1, \mathcal{Z}_2$ – затраты на создание и эксплуатацию сравниваемых технических систем.

Рассмотренный вид показателей технико-экономической эффективности создания и применения сложных технических систем в виде отношения \mathcal{E}/\mathcal{Z} или \mathcal{Z}/\mathcal{E} в двумерном пространстве «технические характеристики – стоимость» для комплексных показателей является простейшим. В общем случае комплексный показатель конструируется исходя из анализа предметной области. Так, для корректного использования комплексных показателей вида \mathcal{E}/\mathcal{Z} и \mathcal{Z}/\mathcal{E} необходимо выявлять зависимость $\mathcal{E}=f(\mathcal{Z})$. Если эта зависимость линейная, применение данных показателей будет оправданным. В противном случае потребуется либо приводить анализируемые варианты в сопоставимый вид по техническому эффекту или по затратам, либо определять их важность экспертными методами, а в общем случае – расширять пространство, в котором определяется критерий эффективности. Анализ предметной области создания РЛС ДО показывает необходимость расширения пространства, в котором определяется комплексный показатель технико-экономической эффективности.

2. Обоснование комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО

В качестве универсального показателя эффективности создания РЛС ДО в общем случае выступает показатель риска [4, 5]. При использовании риска в качестве комплексного показателя эффективности при управлении процессом создания РЛС ДО под риском создания понимается вероятностная мера отклонения характеристик создаваемой РЛС ДО от заданных заказчиком в техническом задании значений, учитывающую как текущие характеристики производственного процесса создания РЛС ДО, прежде всего, его технологическую готовность, так и финансовые и временные ограничения при создании РЛС ДО на стадиях проектирования и производства.

Применение показателя риска позволяет, во-первых, исключить субъективность оценок значимости разнородных факторов для проекта РЛС ДО в целом, во-вторых, использовать единый подход к оценке результатов разработки различных компонентов РЛС ДО, в-третьих, обеспечить эффективность контроля и объективность управления процессом создания РЛС, в-четвертых, формализовать существующий опыт проектирования РЛС ДО предыдущих поколений как для повышения достоверности текущих оценок эффективности производственных процессов, так и для решения задач перспективного планирования развития производства. Последнее обстоятельство, быть может, является основным достоинством использования показателя риска при анализе эффективности управления процессами создания сложных наукоемких технических систем.

Применительно к анализу процессов создания сложных наукоемких технических систем следует различать две группы рисков. Риски первой группы относятся непосредственно к рискам применения создаваемого изделия по целевому назначению, они связаны с его функционированием в ходе последующей эксплуатации. К рискам второй группы рода относятся риски, связанные с опасностью невыполнения проекта или значительными отклонениями результатов выполнения проекта от требуемых, которые приводят к негативным последствиям. Оценка вероятностей негативных событий для рисков первой и второй группы производится на основе различных исходных данных. Для рисков первой группы вероятности событий определяются методами, используемыми в теории надежности для этапа эксплуатации технических систем [13]. Для рисков второй группы вероятности событий определяются методами, описывающими влияние различных факторов на конструкторско-технологическую деятельность предприятия-разработчика технической системы [5].

Сложность проведения технико-экономического анализа вариантов создания РЛС ДО нового поколения, а также модернизации существующих РЛС ДО с учетом их модернизационного потенциала состоит в необходимости учета большого количества разнородных показателей. В общем случае необходимо проводить сравнительный анализ различных технических и эксплуатационных характеристик РЛС ДО и использовать экспертные оценки для определения весовых коэффициентов каждого частного показателя эффективности создания РЛС ДО. В то же время при обосновании показателя технической составляющей комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО необходимо выбрать техническую характеристику, наиболее значимую (важную) с точки зрения применения РЛС ДО по назначению.

Как и у любой сложной технической системы, у РЛС ДО размерность вектора технических характеристик составляет десятки и сотни, и выбор наиболее значимой технической характеристики РЛС ДО носит компромиссный характер. Опыт разработки нескольких поколений РЛС ДО показывает, что с точки зрения применения РЛС ДО по назначению в качестве ее наиболее значимой технической характеристики следует рассматривать энергетический потенциал. Это обусловлено тем, что именно энергетический потенциал РЛС ДО обеспечивает достижение основных технических характеристик, определяющих ее функциональное назначение: вероятность обнаружения радиолокационной цели, точность измерения параметров движения радиолокационной цели, пропускную способность многоканальной РЛС ДО при работе по множеству радиолокационных целей.

Энергетический потенциал многоканальной импульсной РЛС q в общем случае определяется выражением [14]:

$$\frac{P_{\text{изл}} \tau_{\text{имп}} G_{\text{пер}} G_{\text{прм}} \lambda^2 \sigma_c}{4 \pi^3 k_B T_{\text{прм}} R^4 L^2}, \quad (2)$$

где $P_{\text{изл}}$ – суммарная импульсная мощность во всех каналах передающей системы РЛС;

$\tau_{имп}$ – длительность зондирующего импульса;

$G_{пер}$, $G_{прм}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны соответственно (с учетом потерь в передающем и приемном тракте);

λ – длина волны зондирующего излучения;

σ_u – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) радиолокационной цели;

k_B – постоянная Больцмана;

$T_{прм}$ – шумовая температура приемного устройства;

R – дальность до радиолокационной цели;

L – коэффициент потерь на трассе распространения зондирующего и отраженного сигналов.

С энергетическим потенциалом РЛС ДО q , определяемым выражением (2), связаны вероятность правильного обнаружения P_D объекта (радиолокационной цели) и вероятность ложной тревоги P_F . В радиолокации вероятности P_D и P_F рассматриваются как показатели эффективности радиолокационного обнаружения объектов (целей), а зависимости $P_D(q)$ и $P_F(q)$ называются характеристиками обнаружения [14]. Требования к вероятностям P_D и P_F задаются заказчиком в техническом задании на создание РЛС ДО. Кроме того, вероятности P_D и P_F являются показателями помехоустойчивости РЛС ДО, поскольку они определяются в условиях действия помех.

При некогерентном приеме:

$$P_D = P_F^{1-q}. \quad (3)$$

При некогерентном приеме:

$$P_D = \Phi \left[\sqrt{2q} - \sqrt{2 \ln(1/P_F)} \right] \quad (4)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – интеграл вероятности.

Выражение (2) для энергетического потенциала РЛС ДО и выражения (3) и (4) для вероятности правильного обнаружения соответствуют пороговому обнаружению радиолокационных сигналов, принимаемых в условиях белого гауссовского шума. При этом значение энергетического потенциала q , определяемое выражением (2), соответствует отношению сигнал/шум на входе приемного устройства РЛС ДО и зависит от ЭПР цели σ_u , дальности до цели R и шумовой температуры приемного устройства $T_{прм}$. Для того, чтобы показатель технической эффективности создания РЛС ДО не зависел от параметров σ_u , R и $T_{прм}$, вместо отношения сигнал/шум на входе приемного устройства можно рассматривать плотность потока мощности излучения РЛС ДО Q на цели, находящейся на некоторой нормировочной дальности R_H , которая определяется выражением:

$$Q = \frac{P_{изл} G_{пер}}{4\pi R_H^2 L}. \quad (5)$$

При определении величины Q в соответствии с выражением (5), обычно задается значение нормировочной дальности $R_H = 1000 \text{ км}$. Величина Q , может быть выражена в единицах плотность потока мощности или, что более удобно для использования, в децибелах. При этом между показателями q и Q сохраняется однозначная связь:

$$q = \frac{Q \tau_{имп} G_{прм} \lambda^2 \sigma_u R_H^2}{(4\pi)^2 k_B T_{прм} R^4 L}.$$

Покажем, каким образом энергетический потенциал q связан с другими техническими характеристиками РЛС ДО, определяющими ее функциональные возможности. При этом с учетом отмеченной взаимосвязи величин q и Q результаты анализа относятся и к взаимосвязи с анализируемыми техническими характеристиками РЛС ДО плотности потока мощности излучения на цели Q .

1. Дальность (максимальная дальность) обнаружения целей.

Соотношение между дальностью действия РЛС ДО и ее энергетическим потенциалом хорошо формализуются с использованием основных соотношений теории радиолокации [15, 16]. При этом дальность обнаружения R_0 радиолокационных целей (при заданной достоверности обнаружения) рассматривается в качестве максимальной дальности действия РЛС ДО: $R_0 = R_{max}$.

При приеме сигналов, отраженных от радиолокационной цели с ЭПР, σ_u находящейся на дальности R , мощность сигнала на входе приемного устройства составляет:

$$P_{прм} = \frac{P_{изл} G_{прм} G_{пер} \lambda^2 \sigma_u}{(4\pi)^3 R^4 L^2}. \quad (6)$$

При приеме сигналов в условиях шума, характеризуемого в случае белого шума шумовой температурой приемного устройства $T_{прм}$, существует минимально необходимая мощность принимаемого сигнала $P_{прмmin}$, при которой обеспечивается заданная достоверность его обнаружения. Величина $P_{прмmin}$ соответствует предельной чувствительности приемного устройства РЛС ДО и максимальной ее дальности действия.

Выражая через входящие в выражение (6) параметры РЛС ДО и величину $P_{прмmin}$ максимальную дальность действия РЛС ДО, получаем известное уравнение радиолокации:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_{изл} G_{прм} G_{пер} \lambda^2 \sigma_u}{(4\pi)^3 P_{прмmin} L^2}}. \quad (7)$$

Определяемая уравнением радиолокации (7) максимальная дальность действия РЛС ДО R_{max} может быть выражена через определяемый выражением (2) энергетический потенциал РЛС ДО q :

$$R_{max} = R \sqrt[4]{\frac{q k_B T_{прм}}{P_{прмmin} \tau_{имп}}}. \quad (8)$$

В соответствии с полученным выражением (8) дальность обнаружения целей $R_0 = R_{max}$, как функция $R_0 = R_0(q)$ от энергетического потенциала q зависит от него пропорционально корню четвертой степени, и чем выше энергетический потенциал, тем выше дальность обнаружения целей. При этом зависимость дальности обнаружения от энергетического потенциала носит критический характер – для увеличения дальности обнаружения в 2 раза необходимо увеличение энергетического потенциала в 16 раз.

2. Пропускная способность.

Под пропускной способностью РЛС ДО понимается количество объектов (радиолокационных целей), которые могут сопровождаться в единицу времени (обычно в минуту). При этом сопровождению объекта предшествует его обнаружение и параллельно может происходить обнаружение одних объектов и сопровождение других объектов. Исходя из логики работы РЛС ДО, ее временной ресурс расходуется, в основном, на обнаружение объектов и частично на их сопровождение.

Пропускная способность РЛС ДО может быть определена в следующем виде:

$$B = N_{обн} + N_{сопр},$$

где $N_{обн}$ – количество объектов, которые могут быть обнаружены РЛС ДО за заданную единицу времени;

$N_{сопр}$ – количество объектов, которые могут сопровождаться РЛС ДО за заданную единицу времени (без потери сопровождения).

Величины $N_{обн}$ и $N_{сопр}$, определяющие пропускную способность РЛС ДО B , в свою очередь, могут быть выражены через параметры, характеризующие условия обнаружения и сопровождения объектов.

Количество объектов, которые могут быть обнаружены РЛС ДО за заданную единицу времени, определяется по формуле:

$$N_{обн} = \frac{T_{обн}}{K \cdot N \cdot T_3}, \quad (9)$$

где $T_{обн}$ – интервал времени, выделенный на обнаружение объектов в пределах интервала времени, для которого определяется пропускная способность;

K – количество направлений обзора сектора ответственности;

N – количество радиолокационных контактов с объектом, необходимых для обеспечения требуемой вероятности его обнаружения;

T_3 – длительность излучения и приема радиолокационного сигнала (одного радиолокационного контакта).

Количество объектов, которые могут сопровождаться РЛС ДО за заданную единицу времени, определяется по формуле:

$$N_{сопр} = \frac{T_{сопр}}{N_3 \cdot T_3}, \quad (10)$$

где $T_{сопр}$ – интервал времени, выделенный на сопровождение объектов в пределах интервала времени, на котором считается пропускная способность;

N_3 – количество радиолокационных зондирований пространства, необходимых для сопровождения требуемого количества объектов;

T_3 – длительность излучения и приема радиолокационного сигнала (одного радиолокационного зондирования пространства).

В соответствии с выражениями (9) и (10) количество обнаруживаемых и сопровождаемых РЛС ДО объектов обратно пропорционально зависит от двух величин: количества необходимых радиолокационных контактов с объектом N и длительности излучения и приема радиолокационного сигнала T_3 . Чем меньше значения указанных величин, тем больше количество обнаруживаемых $N_{обн}$ и сопровождаемых $N_{сопр}$ объектов в единицу времени и пропускная способность РЛС ДО B . Для увеличения пропускной способности РЛС ДО B необходимо уменьшение значений N и T_3 , а это с одновременным выполнением требований к техническим характеристикам РЛС ДО в части вероятности обнаружения целей P_D в соответствии с выражениями (3) и (4) возможно только путем увеличения энергетического потенциала РЛС ДО q . В результате пропускная способность B как функция $B=B(q)$ от энергетического потенциала q зависит от него монотонно в соответствии с характером зависимости от q вероятностей P_D и P_F , и чем выше энергетический потенциал РЛС ДО, тем выше ее пропускная способность.

3. Временные характеристики обнаружения и классификации объектов.

Временными характеристиками работы РЛС ДО являются время обнаружения объекта в секторе ответственности и время его классификации. Результатом классификации объекта является

выдача типового сообщения. Время обнаружения объекта в угловом секторе ответственности РЛС ДО определяется выражением:

$$T_o = K \cdot N \cdot T_3, \quad (11)$$

где K – количество направлений обзора в угловом секторе ответственности;

N – количество радиолокационных контактов с объектом, необходимых для обеспечения требуемой вероятности обнаружения;

T_3 – длительность излучения и приема радиолокационного сигнала (одного радиолокационного контакта).

В соответствии с выражением (11) величина T_o тем меньше, чем меньше значения N и T_3 . Таким образом, как и в случае пропускной способности РЛС ДО, уменьшение времени обнаружения объекта T_o обеспечивается уменьшением значений N и T_3 . Уменьшение значений параметров N и T_3 с одновременным выполнением требований к техническим характеристикам РЛС ДО в части вероятности обнаружения целей в соответствии с выражениями (3) и (4) возможно только путем увеличения энергетического потенциала РЛС ДО q . В результате время обнаружения целей T_o как функция $T_o = T_o(q)$ от энергетического потенциала объекта q зависит от него монотонно в соответствии с характером зависимости от q вероятностей P_D и P_F , и чем выше энергетический потенциал, тем меньше время обнаружения объекта.

Аналогичным образом может быть выражено время классификации объекта в РЛС ДО с учетом заданной вероятности правильной классификации:

$$T_k = N_k \cdot T_3, \quad (12)$$

где N_k – количество радиолокационных контактов с объектом, необходимых для обеспечения заданной вероятности правильной классификации;

T_3 – длительность излучения и приема радиолокационного сигнала (одного радиолокационного контакта).

В соответствии с выражением (12) величина T_k тем меньше, чем меньше значения N_k и T_3 . Таким образом, как и в случае времени обнаружения объекта, уменьшение времени классификации объекта T_k обеспечивается уменьшением значений N_k и T_3 . Уменьшение значений параметров N_k и T_3 с одновременным выполнением требований к техническим характеристикам РЛС ДО в части вероятности обнаружения целей в соответствии с выражениями (3) и (4) возможно только путем увеличения энергетического потенциала РЛС ДО q . В результате время классификации целей T_k как функция $T_k = T_k(q)$ от энергетического потенциала q зависит от него монотонно в соответствии с характером зависимости от q вероятностей P_D и P_F , и чем выше энергетический потенциал, тем меньше время классификации объекта.

Таким образом, энергетический потенциал q и связанная с ним плотность потока мощности излучения на цели Q являются взаимосвязанными скалярными параметрами, значимыми с точки зрения применения создаваемой РЛС ДО по назначению, и могут быть использованы в качестве технической составляющей комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО. В пространстве определения комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО техническая характеристика q или Q дополняется составляющими стоимости создания Z и времени создания ΔT РЛС ДО. Введение составляющей времени является расширением исходного пространства признаков «технические характеристики – стоимость» и отражает то обстоятельство, что для проектов по созданию РЛС ДО характерны длительные сроки реализации – до десятка лет, и сокращение сроков создания является

важным фактором повышения эффективности производственного процесса. Представление процесса создания РЛС ДО в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время» показано на рисунке 1.

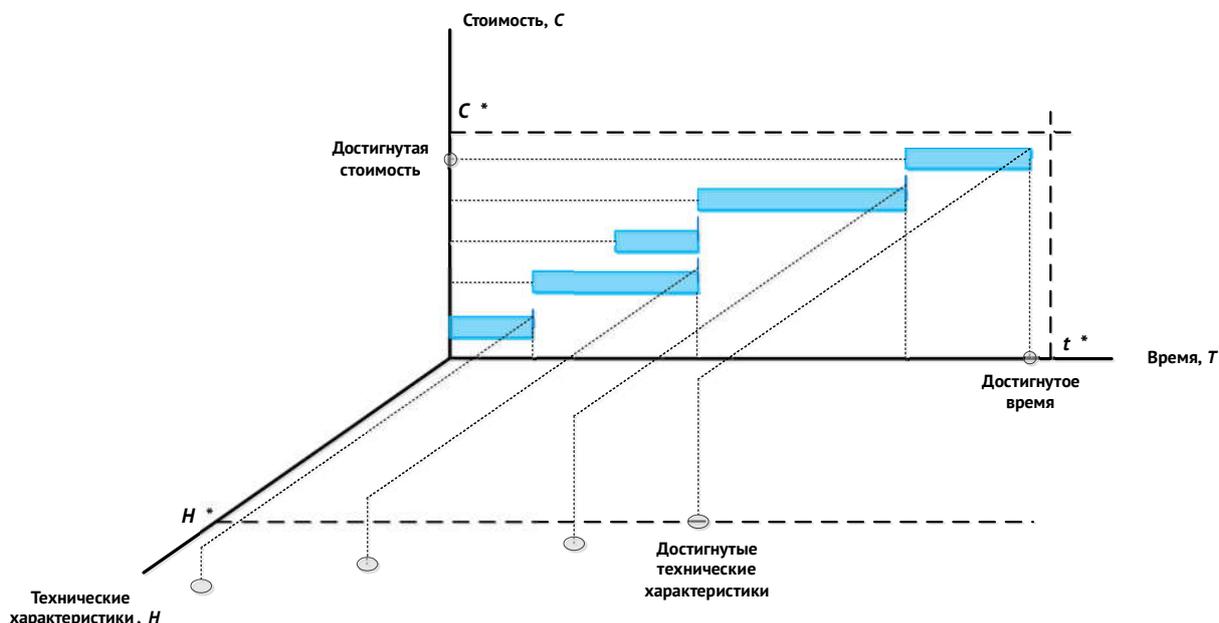


Рисунок 1 – Процесс создания РЛС ДО в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время»

Очевидно, что эффективность создания сложной технической системы тем выше, чем лучше ее технические характеристики, чем меньше стоимость и чем меньше сроки создания. Исходя из этого комплексный показатель технико-экономической эффективности создания РЛС ДО определяется в пространстве «технические характеристики – стоимость – время» в виде $E = (Z \cdot \Delta T) / Q$, а критерием эффективности создания РЛС ДО является минимум данного комплексного показателя:

$$E_{min} = \min_{x \in X} [Z(x) \Delta T / Q(x)] \Big|_{\substack{Q(x) \in Q' \\ Z(x) \in Z' \\ \Delta T(x) \in \Delta T'}} \quad (13)$$

где x – вариант достижения цели создания РЛС ДО из множества допустимых вариантов X ;

$Q(x)$, $Z(x)$, $\Delta T(x)$ – значения достижимого энергетического потенциала Q , затрат на создание Z и времени создания ΔT РЛС ДО для варианта x ;

Q' , Z' , $\Delta T'$ – допустимые области изменения энергетического потенциала Q , затрат на создание Z и времени создания ΔT РЛС ДО соответственно.

Следует отметить, что задание ограничений на допустимые области изменения составляющих введенного комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО не является формальным. Так, нет смысла рассматривать значения показателей стоимости Z и времени ΔT , близкие к нулю. При отсутствии затрат и времени на выполнение работ никакое изделие вообще не может быть создано, хотя формально комплексный показатель E в этом случае минимален.

С использованием введенного комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО $E = (Z \cdot \Delta T) / Q$ были проанализированы энергетический потенциал, стоимость и сроки создания отечественных РЛС ДО нескольких поколений [17, 18].

3. Анализ комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО различных поколений

Повышение технико-экономической эффективности создания РЛС ДО с заданными техническими характеристиками и функциональными возможностями является актуальной задачей управления производством. В результате проведенного анализа были получены значения комплексного показателя технико-экономической эффективности $E=(Z \cdot \Delta T)/Q$ и его составляющих для отечественных РЛС ДО второго, третьего и четвертого поколений, которые приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Показатели эффективности создания РЛС ДО различных поколений

Показатели	РЛС ДО 2-го поколения	РЛС ДО 3-го поколения	РЛС ДО 4-го поколения
Длительность создания, лет	14	12	4–5
Стоимость создания, усл. ед.	600	160	200–250
Энергетический потенциал, дБ	62	33	46–52
Коэффициент унификации, %	0	60	80–90

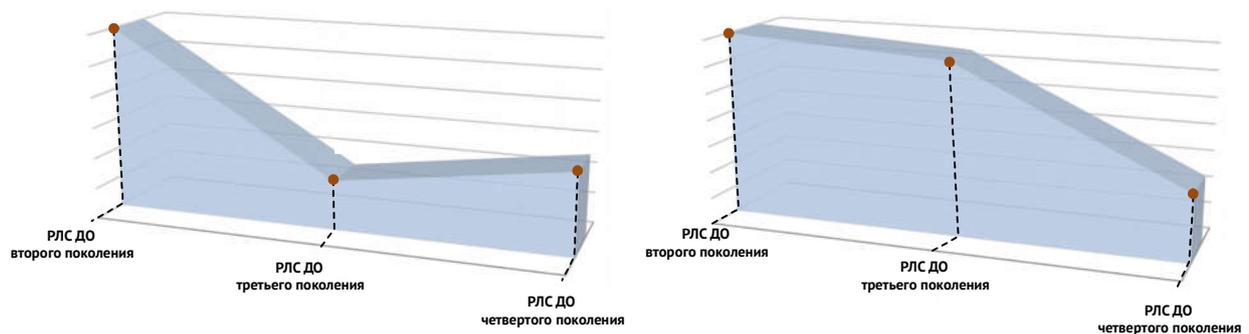
Поколения РЛС ДО были выделены в соответствии с эволюцией их развития, приведенной в работах [4, 18]. К РЛС ДО второго поколения относятся РЛС «Дарьял» и «Дон-2Н», к РЛС третьего поколения – РЛС «Волга», «Воронеж-М» и «Воронеж-ДМ», к РЛС ДО четвертого поколения – перспективные РЛС «Воронеж-СМ» и «Воронеж-ВП». Для последнего четвертого поколения РЛС ДО, которое создается в настоящее время, приведены оценки анализируемых параметров в виде диапазонов их значений. РЛС ДО третьего и четвертого поколений серии «Воронеж» создаются как радиолокационные системы унифицированного ряда по технологии высокой заводской готовности (ВЗГ), что позволяет существенно снизить стоимость их создания при обеспечении высокого уровня технических характеристик.

Таблица 2 – Комплексные показатели эффективности создания РЛС ДО различных поколений

Пространство определения комплексного показателя	РЛС ДО 2-го поколения	РЛС ДО 3-го поколения	РЛС ДО 4-го поколения
«Технические характеристики – стоимость»	9,7	4,8	4,3–4,8
«Технические характеристики – стоимость – время»	135,5	58,2	17,4–24,0

В Таблице 1 кроме значений энергетического потенциала Q , стоимости создания Z и времени создания ΔT также приведены значения коэффициента унификации (в процентах) для различных поколений РЛС ДО. Коэффициент унификации рассматривается в качестве важного показателя технологического процесса создания РЛС ДО. Именно унификация компонентов и технических решений, являющаяся отличительной особенностью технологии ВЗГ, позволяет сократить сроки создания и стоимость создания РЛС ДО, что особенно заметно для РЛС ДО четвертого поколения. В Таблице 2 сравниваются значения комплексных показателей технико-экономической эффективности создания РЛС ДО Z/Q и $Z \Delta T/Q$, введенных в двумерном пространстве «технические характеристики – стоимость» и в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время» соответственно.

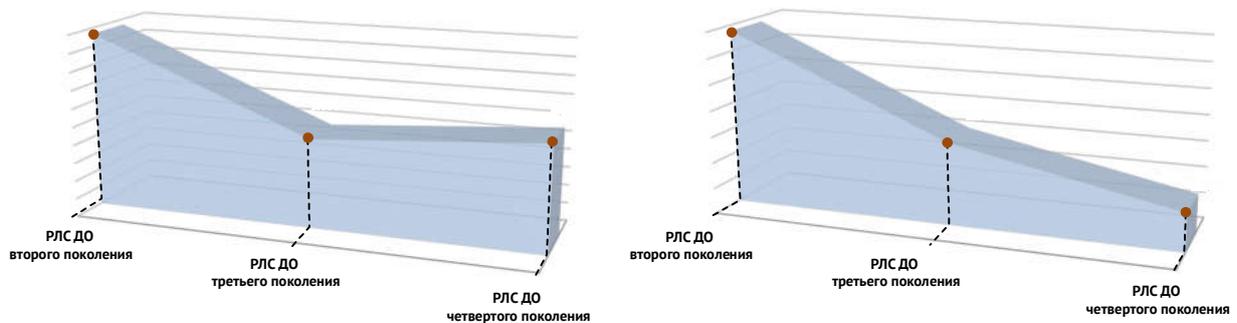
На рисунке 2 в виде диаграмм показана динамика изменения от поколения к поколению РЛС ДО значений показателей стоимости Z (а) и времени создания ΔT (б) РЛС ДО. На рисунке 3 в виде диаграмм показана динамика изменения от поколения к поколению РЛС ДО значений комплексных показателей технико-экономической эффективности создания РЛС ДО Z/Q (а) и $Z \Delta T/Q$ (б). Критерием эффективности в обоих случаях является минимум анализируемых комплексных показателей.



а)

б)

Рисунок 2 – Динамика изменения стоимости (а) и длительности (б) создания РЛС ДО различных поколений



а)

б)

Рисунок 3 – Динамика изменения комплексных показателей технико-экономической эффективности создания РЛС ДО в пространстве «технические характеристики – стоимость» (а) и в пространстве «технические характеристики – стоимость – время» (б)

Приведенные данные показывают, что значительное снижение стоимости создания РЛС ДО произошло при переходе от второго к третьему поколению РЛС ДО, а значительное снижение времени создания РЛС ДО происходит при переходе от третьего к четвертому поколению, что обусловлено использованием отработанной технологии ВЗГ. Как следствие, при близости технических характеристик РЛС ДО комплексный показатель технико-экономической эффективности создания РЛС ДО Z/Q , определяемый в двумерном пространстве «технические характеристики – стоимость», заметно уменьшается при переходе от второго к третьему поколению РЛС ДО, а при переходе от третьего к четвертому поколению РЛС ДО даже несколько увеличивается. В то же время комплексный показатель технико-экономической эффективности создания РЛС ДО $Z \Delta T/Q$, определяемый в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время», монотонно уменьшается при переходе от второго к третьему и от третьего к четвертому поколению РЛС ДО. Такой характер изменения технико-экономической эффективности создания РЛС ДО согласуется с экспертными оценками и отражает вклад сроков реализации проектов в эффективность создания сложных технических систем.

Проведенный для РЛС ДО различных поколений анализ предложенного комплексного показателя технико-экономической эффективности создания РЛС ДО показывает его конструктивность. Значение комплексного показателя, определяемого в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время», дает интегральную оценку технико-экономической эффективности создания РЛС ДО, что позволяет его использовать для оценки принятых технических и технологических решений при создании существующих РЛС ДО и сравнительного анализа вариантов построения перспективных РЛС ДО.

Заключение

Рассмотренный в статье круг вопросов характеризует важность выбора показателей при оценке технико-экономической эффективности технических и технологических решений, принимаемых при создании сложных технических систем. Для РЛС ДО, являющихся сложными наукоемкими техническими системами с длительными сроками создания и небольшим числом изделий в серии, вопрос выбора показателя технико-экономической эффективности при их создании особенно важен, поскольку возникает необходимость оценивать эффективность принимаемых решений на различных этапах реализации проекта, не дожидаясь его завершения, как в сравнении с ранее достигнутыми результатами, так и для сравнения альтернативных вариантов при управлении процессом создания РЛС ДО.

Предложен новый комплексный показатель технико-экономической эффективности создания РЛС ДО, определяемый в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время», учитывающий особенности создания РЛС ДО и выполнения ими целевых задач в процессе применения по назначению. В сравнении с традиционно используемыми показателями технико-экономической эффективности сложных технических систем, определяемыми в двумерном пространстве «технические характеристики – стоимость», пространство определения предложенного комплексного показателя дополнено составляющей времени создания РЛС ДО и обосновано использование в качестве технической характеристики, наиболее значимой при применении РЛС ДО, ее энергетического потенциала на объекте (радиолокационной цели) или на входе приемного устройства.

С использованием предложенного комплексного показателя формулируется критерий технико-экономической эффективности, позволяющий выбрать оптимальные технические и технологические решения при создании РЛС ДО. В практике реализации проектов по созданию РЛС ДО предложенный показатель технико-экономической эффективности может быть использован для анализа вариантов построения создаваемых и перспективных РЛС ДО, определения модернизационного потенциала существующих РЛС ДО и определения ряда РЛС ДО, как группы РЛС ДО с близкими функциональными возможностями, сроками и стоимостью создания.

Список использованных источников

1. Гаврилин Е.В. Эпоха «классической» ракетно-космической обороны. – М.: Техносфера, 2008. – 168 с.
2. Красковский В.М. Щит России: системы противоракетной обороны. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 504 с.
3. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование / Под ред. С.Ф. Боева. – М.: Радиотехника, 2013. – 168 с.
4. Боев С.Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 430 с.

5. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения / Под ред. С.Ф. Боева. – М.: Научная книга, 2019. – 424 с.
6. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1. Методология, методы, модели. – М.: МО СССР, 1989. – 660 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 высокотехнологической продукции. – М.: Граница, 2012. – 423 с.
9. Цветков А.Г. Принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. – М.: Советское радио, 1971. – 200 с.
10. Радиотехнические системы передачи информации / Под ред. В.В. Калмыкова. – М: Радио и связь, 1990. – 304 с.
11. Исследование операций в экономике / Под ред. Н.Ш. Кремера. – М.: ЮНИТИ, 2003. – 407 с.
12. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
13. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 478 с.
14. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1978. – 608 с.
15. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, 2007. – 376 с.
16. Радиолокационные системы / Под ред. В.П. Бердышева. – Красноярск: СФУ, 2012. – 402 с.
17. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
18. История отечественной радиолокации / Под ред. С.В. Хохлова. – М.: Столичная энциклопедия, 2015. – 736 с.