
ИМИТАЦИОННАЯ СХЕМА РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ ПО ЭТАПАМ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМЫ ОРУЖИЯ ЗАДАННЫХ РИСКОВ

А.С. Афанасьев, Ю.Л. Вященко, К.М. Иванов, С.А. Матвеев (Санкт-Петербург)

В процессах разработки систем оружия заданных рисков (надёжности) следует различать возможные постановки оптимизационных задач. Условно можно считать задачами оптимизации процесса разработки изделия заданных рисков (надёжности) 1-го рода задачи, связанные с обоснованием оптимальных требований по надёжности разрабатываемых изделий. В таких задачах в качестве критерия оптимизации используется критерий «эффективность-стоимость», обобщающий расходы на разработку, производство и эксплуатацию изделия за весь жизненный цикл. Характер зависимости затрат от уровня надёжности изделия подчиняется известным закономерностям (рис.1).

В военной технике освоены методики оптимизации требуемых значений системных показателей (СП), задаваемых в ТТЗ на разработку новых изделий [1]. При рассмотренном подходе оптимальное значение уровня надёжности образца СО находится в области близкой к минимальной величине стоимости жизненного цикла (заштрихованная область на рис. 1, б), что соответствует принятому критерию «эффективность-стоимость».

В связи с ростом требований к военной технике задача оптимизации процесса разработки изделия заданных рисков (надёжности) 1-го рода по-прежнему актуальна. Традиционные оптимизационные задачи в процессах жизненного цикла связаны с поиском решений, определяющих оптимальность конструкции, оптимальность технологии, оптимальность производства, оптимальность логистики при минимизации целевых функций: $C \rightarrow \min$ (затраты), $T \rightarrow \min$ (сроки). Наряду с рассмотренными оптимизационными задачами 1-го рода, всё большее значение приобретают задачи оптимизации процесса разработки СО заданных рисков (надёжности) 2-го рода. Эти задачи связаны с оптимизацией распределения затрат по этапам и процессам жизненного цикла, сокращением сроков сдачи изделий Заказчику, минимизацией рисков. Значение таких задач усиливается в связи с контрактами жизненного цикла, обязывающими обеспечивать управление процессами жизненного цикла на всех этапах, включая эксплуатацию изделия.

При сохранении целевой установки (спроектировать образец СО заданной надёжности, отвечающий всем требованиям ТТЗ, в заданные сроки, минимизируя средства, необходимые для его создания) в качестве критериев оптимизации процесса разработки такого изделия целесообразно использовать суммарные затраты на разработку образца, соотнесённые с неорганизованностью функционирования системы (O) [2], или, что эквивалентно, с обеспечиваемыми требуемыми по ТТЗ уровнями допустимых рисков (надёжностных характеристик) изделия и гарантии их достижения (здесь СП рассматриваются с информационно-системных позиций в соответствии с введённой аксиоматикой [1,2,3]).

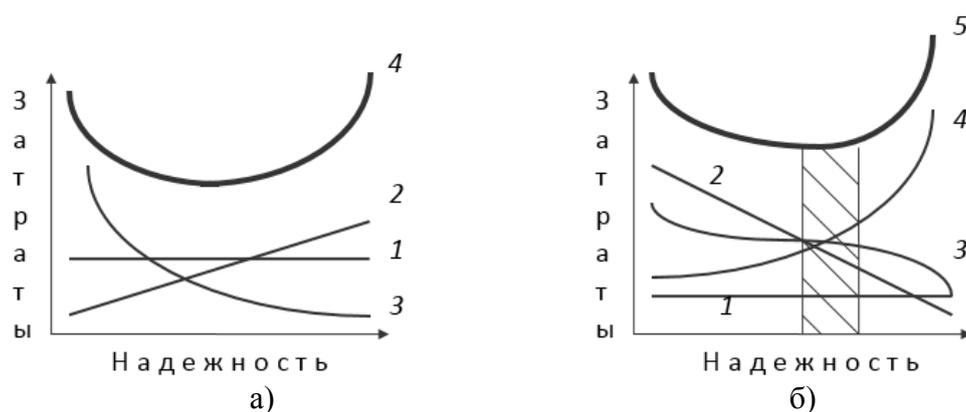


Рис.1. Зависимость затрат поставщика (А) и заказчика (Б) от надёжности:
 а) - 1 - основная стоимость образца, 2 - затраты на обеспечение надёжности, 3 - стоимость доработок, 4 - суммарные затраты поставщика; б) - 1 - стоимость применения образца, 2 - затраты на устранение отказов, 3 - затраты на техническое обслуживание и ремонт, 4 - стоимость образца, 5 - суммарное значение стоимости жизненного цикла

Оптимизационные задачи 1-го и 2-го рода взаимосвязаны и взаимосвязаны, в первую очередь, в направленности на управление рисками и их минимизацию в процессах жизненного цикла.

Информационно-системная формализация, оперирующая информационными мерами, критериями и шкалами, вводит в обращение информационные показатели (η_j - информационные коэффициенты адекватности). Эти показатели дополняют средства решения как традиционных оптимизационных задач 1-го рода, так и обуславливают постановку и решение задач оптимизации 2-го рода в рамках проектно-конструкторских процессов жизненного цикла изделия. Распространение информационно-системной формализации на этапы КТПП, производства, эксплуатации, отличающиеся своей спецификой, приводит к необходимости введения новых информационных показателей, выполняющих ту же роль, что и информационный показатель адекватности η_j в проектно-конструкторских процессах.

Введение новых показателей обуславливается также необходимостью учитывать факт «информационного разрыва» в точках перехода с этапа на этап в процессах жизненного цикла. Преодоление информационных разрывов требует информационного согласования этапов (рис. 2).

Представляется оправданным введение критериев - информационного коэффициента воспроизводимости V_j и информационного коэффициента логистичности W_j . Эти показатели являются параметрами модели проектного решения МПР_j на j-м этапе жизненного цикла [3].

Показатели воспроизводимости V_j и логистичности W_j , также как и информационный показатель адекватности η_j могут рассматриваться в качестве управлений в оптимизационной задаче.

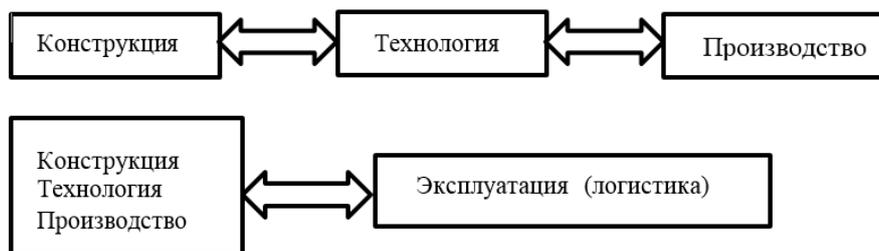


Рис. 2. Информационно-системные связи этапов жизненного цикла.
(здесь \longleftrightarrow обозначает процедуры согласования)

Использование в качестве управлений показателей η_j , V_j , W_j расширяет постановку оптимизационной задачи 2-рода, повышает эффективность поиска решений, направленных на устранение причин, вызывающих риски на всех этапах жизненного цикла, способствует ускорению процессов/

Информационный коэффициент воспроизводимости V – интегральный показатель КТПП - характеризует технологичность и возможность изготовления изделия (реализуемость в производстве). Показатель V_j ($0 \leq V_j \leq 1$) характеризует степень согласованности в модели МПР_j (результат j-го проектного этапа) решений конструкторских, технологических, производственных. На каждом этапе жизненного цикла достигается выполнение условия $V_j \geq [V_j]$, где $[V_j]$ – значение показателя, при котором возможен переход на j+1 проектный этап. Информационный коэффициент воспроизводимости по определению «отслеживает» степень согласованности как конструкторско-технологических, так и технолого-производственных решений (рис. 2). Первые из этих решений реализуются в чертежно-конструкторских и электронных (3D) разработках, а вторые в оценках технологичности, трудоемкости, в назначении производственных маршрутов и т.п. Отмеченное позволяет ввести предположение о статистической независимости двух составляющих V_{TK} , V_{TP} информационного коэффициента воспроизводимости V_j , что приводит к выражению:

$$V_j = f(V_{TK}, V_{TP}) = V_{TK} V_{TP} \quad (1)$$

где V_{TK} ($0 \leq V_{TK} \leq 1$) - составляющая коэффициента воспроизводимости, характеризующая согласованность решений конструктора и технолога через «разрешение профессиональных противоречий», V_{TP} ($0 \leq V_{TP} \leq 1$) - составляющая коэффициента воспроизводимости, характеризующая согласованность (реализуемость) технологических решений и производства.

Управлением в обсуждаемой оптимизационной задаче 2-го рода будут выступать параметры, обуславливающие реализацию поэтапной разработки изделия, при которой система поиска и принятия конструкторско-технологических решений обеспечивает достижение поставленной цели. С учетом введённой информационно-системной модели процесса разработки образца СО заданных рисков (надёжности) [2,3] в качестве управления в оптимизационной задаче предлагается использовать показатель адекватности η_j , $j = \overline{1, s}$. Ограничениями в задаче выступают требования ТТЗ к

значениям СП и степени достоверности их достижения γ , отнесённые к этапам разработки образца СО заданных рисков (надёжности).

Постановка рассматриваемой задачи рационального распределения затрат по этапам разработки СО заданных рисков (надёжности) позволяет теоретически обоснованно и наиболее эффективно реализовать «перекачку» статистической информации с предшествующих проектных этапов [2]. Для получения оценок анализируемых СП становится необходимым использование арсенала методов имитационного моделирования, эффективных статистических процедур обработки данных, в том числе, процедур, оперирующих информативными характеристиками.

В качестве статистических процедур оценивания информативности текущего проектного этапа при известных значениях ($[СП_j], \gamma_j$) (в виде доверительных интервалов и соответствующих уровней доверия) могут использоваться соотношения:

$$I_{\text{вых } j} = \gamma_j \lg \frac{\gamma_j}{\underline{ПН}_j} + (1 - \gamma_j) \lg \frac{(1 - \gamma_j)}{(1 - \underline{ПН}_j)} \quad (2)$$

где $\underline{ПН}_j$ - нижняя граница интервала значений $ПН_j$ (вероятность безотказной работы) $[\underline{ПН}_j, 1]$; γ_j - доверительная вероятность [3].

С точки зрения обеспечения заданных в ТТЗ требований по допустимым рискам (надёжности) с подтверждением их гарантированного выполнения, наряду с выработкой наилучших проектно-конструкторских решений, в процессе разработки СО постоянно происходит генерация информации, в том числе средствами имитационного моделирования, используемой для оценки достигнутых значений СП и подтверждения достоверности их определения. При этом реальные условия разработки образца (ограниченность ресурсов) обязывают в максимальной мере использовать возможную априорную информацию. В связи с этим характерным для решения оптимизационных задач управления рисками (надёжности) 2-го рода является учёт информации о СП предшествующих этапов разработки изделия ($I_{\text{ex } j}^{(j-1)}$). Для объединения информации о достигнутой надёжности разрабатываемого образца СО по проектным этапам могут быть использованы байесовские процедуры.

Информативность каждого этапа разработки образца СО повышается за счёт его внутренних резервов, рационального распределения и совершенствования конструктивно-технологических методов и средств, подчинённых логике соответствующего проектного этапа и направленных, в конечном итоге, на практически полное раскрытие всех неопределённостей, которые в принципе не могут быть определены на предшествующих этапах разработки образца.

С учётом сказанного, постановка оптимизационной задачи создания СО заданных рисков (надёжности) (оптимизационной задачи управления рисками 2-го рода) состоит в следующем. Необходимо так организовать процесс создания СО, чтобы за счёт управления ресурсами и степенью приближения поэтапного результата

разработки к конечному облику изделия достичь выполнения требований ТТЗ с заданным уровнем гарантии в заданные сроки и с минимальным расходом средств.

В формальной постановке (в терминах изложенной методологии) рассматриваемая задача в обобщённом виде формулируется следующим образом: по этапам разработки образца СО ($j = \overline{1, s}$) распределить ресурсы (C_j) и степень приближения поэтапных результатов разработки к конечному облику изделия (η_j)

таким образом (иначе, управление в задаче $\left\{ \begin{matrix} C_j \\ \eta_j \end{matrix} \right\} j = \overline{1, s}$ выбрать таким), чтобы свести

к нулю неорганизованность проектирующей системы $\bar{O} \rightarrow 0$ и одновременно минимизировать суммарные затраты (C_Σ) на разработку,

В такой формулировке оптимизационная задача является многокритериальной. Вместе с тем, реальное проектирование СО предполагает поэтапный контроль выполнения требований к изделию и переход к очередному этапу разработки происходит только при условии их соответствия ТТЗ.

Это обстоятельство позволяет свести задачу к однокритериальной за счёт перевода критерия \bar{O} ($\bar{O} \rightarrow 0$) в разряд ограничений. С учетом эквивалентности соотношения $\bar{O} \rightarrow 0 \equiv \{СП_{ij} \in [СП_{ij}] \gamma_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}\}$ оптимизационная задача приобретает вид

$$\left\{ \begin{matrix} C_j \\ \eta_j \end{matrix} \right\} j = \overline{1, s} : \quad C_\Sigma \rightarrow \min \\ \{СП_{ij} \in [СП_{ij}] \gamma_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}\} \quad (3)$$

Управление в рассматриваемой оптимизационной задаче представляется вектором обобщённых характеристик - поэтапными затратами (C_j) и показателем адекватности (η_j). В реальном процессе разработки АО заданной надёжности это обобщённое управление реализуется через управляющие воздействия, определяемые, в свою очередь, взаимодействием потоков информации и преобразующих их операторов.

Постановка оптимизационной задачи 2-рода в расширенном варианте в условиях контракта жизненного цикла формулируется следующим образом. Управления в виде значений информационных показателей η_j , V_j , W_j и поэтапных затрат C_j должны быть выбраны такими, чтобы минимизировать суммарные затраты C_Σ при выполнении ограничений на значения системных параметров $СП_j$ и на заданные сроки T_Σ :

$$\left\{ \begin{matrix} C_j \\ \eta_j \\ V_j \\ W_j \end{matrix} \right\} j = \overline{1, s} : \quad \Rightarrow \quad C_\Sigma \rightarrow \min \\ \{СП_{ij} \in [СП_{ij}] \gamma_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}\}: T_\Sigma \leq [T] \quad (4)$$

Представленная оптимизационная задача, имеющая инновационный характер, направлена на поиск оптимальных проектных решений с учетом взаимозависимости процессов по этапам жизненного цикла СО.

Решение, представленной оптимизационной задачи, неизбежно связано с рассмотрением и исследованием возможных сценариев, ситуаций, условий, данных в поиске оптимальных вариантов, в имитировании широкого спектра значений каждого из указанных факторов. Поиск решения предполагает сопряжение методов имитационного моделирования и оптимизационных процедур.

Качественный характер предполагаемого эффекта оптимизации информационных процессов в рамках контракта жизненного цикла СО продемонстрирован на рис. 3, где — и ---- динамика затрат (C) на создание образца по этапам разработки и в процессе эксплуатации соответственно до и после оптимизации информационных процессов.

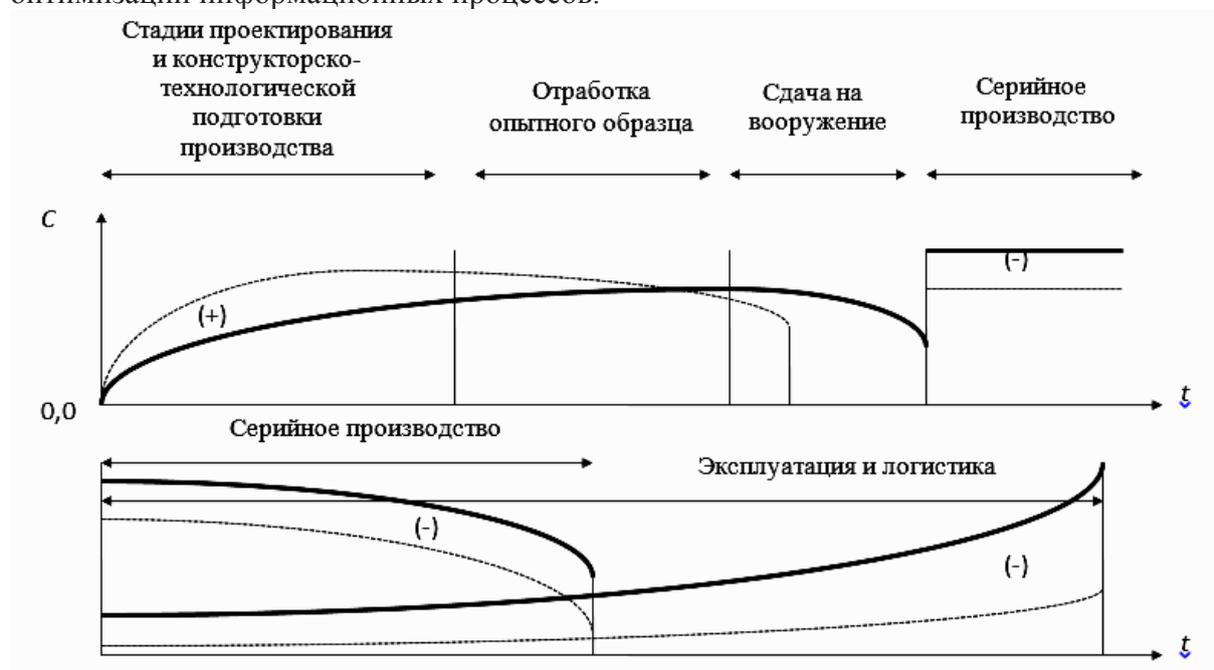


Рис. 3. Затраты по этапам контракта жизненного цикла образца СО

Литература

1. Афанасьев А.С., Вященко Ю.Л., Иванов К.М. Модернизация процессов создания комплексов вооружения с целью обеспечения гарантированных характеристик надежности, безопасности, рисков. «Оборонная техника» № 10, 2014.
2. Афанасьев А.С., Вященко Ю.Л., Иванов К.М. Информационные меры и шкалы в задачах оптимизации процессов жизненного цикла систем оружия. «Оборонная техника» № 12, 2014.
3. Афанасьев А.С., Вященко Ю.Л., Иванов К.М. Инновационная информационно-системная формализация процессов жизненного цикла системы оружия в условиях контракта жизненного цикла. «Инновации» № 9, 2015.