

УДК 623

А.И. БУРАВЛЕВ, доктор
технических наук, профессор
Г.А. ЕЛАНЦЕВ

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

В статье рассматриваются вероятностные модели управления готовностью образцов вооружения и военной техники на различных стадиях жизненного цикла. Для этапов разработки и производства предлагается использовать полумарковские модели с использованием логистических функций распределения вероятности времени выполнения поэтапных работ. Для получения заданного уровня готовности и минимальной стоимости создания образца решается обратная задача динамики с использованием метода динамического программирования. Для этапа эксплуатации используется полумарковская модель обеспечения технической готовности образца с регенерацией за счет проведения восстановительного ремонта. Управление технической готовностью осуществляется по технико-экономическому критерию «стоимость-готовность».

Ключевые слова: вооружение, военная техника; жизненный цикл; вероятность; полумарковская модель; уровень готовности; интенсивность; дельта-функция.

Введение

Развитие современных вооружения и военной техники (ВВТ) связано с их непрерывным усложнением, увеличением сроков и стоимости разработки, производства и эксплуатации. Все это приводит к резкому увеличению военных расходов на закупку и оснащение вооруженных сил ВВТ, поддержание их в исправном и боеготовом состоянии. В ведущих зарубежных странах (США, Великобритания, Франция, Евросоюз, Китай) в целях снижения затрат на закупку военной продукции разрабатываются специальные «программы приобретения» военной продукции [1], учитывающие все аспекты разработки, производства, закупки и поддержки ВВТ на этапе эксплуатации. Эти программы включают в себя нормативно-правовые, финансово-экономические, административно-организационные и технологические механизмы, обеспечивающие управление всеми процессами жизненного цикла военной продукции.

Управление жизненным циклом (ЖЦ) ВВТ в отечественной теории и практике военного планирования также рассматривается как перспективное направление военно-технической политики и механизмов ее реализации на современном этапе [1-4].

В научных работах как зарубежных, так и отечественных авторов, посвященных данной проблематике, широко освещены методология, теоретические и прикладные методы моделирования процессов разработки и эксплуатации ВВТ, а также необходимые для их реализации программные средства [5-9]. Однако до широкого и полного их применения в практике проектирования, производства и эксплуатации ВВТ время еще не пришло. Причинами этому являются различные методологические, экономические и организационные аспекты реализации этой сложной проблемы.

В качестве одного из методических аспектов можно указать сложность выбора математического аппарата для моделирования процессов ЖЦ ВВТ, который, с одной стороны, был бы достаточно адекватным реальным процессам, а с другой, – обеспечивал бы возможность его программно-технической реализации доступными средствами.

В данной статье рассматривается модель полумарковских процессов, в наибольшей степени пригодная, с точки зрения авторов, к описанию процессов разработки, производства и эксплуатации ВВТ, а также ее практической реализации современными программными средствами.

1. Анализ процессов, составляющих жизненный цикл ВВТ

Типовой ЖЦ ВВТ состоит из последовательности стадий (рисунок 1): исследование и обоснование разработки, разработка, производство (ПР), эксплуатация (Э), капитальный ремонт (КР), утилизация (У). Каждой стадии ЖЦ в свою очередь соответствует типовое содержание (этап) выполняемых работ¹.

На стадии исследования и обоснования разработки прорабатываются заказчик и исполнители работ, выполняются научно-исследовательская работа (НИР) по созданию изделия, аванпроект.

Стадия характеризуется эволюционным изменением процессов создания изделия от возникновения замысла до обоснования возможности и целесообразности его создания.

¹ ГОСТ В 15.004-2004. Военная техника. Стадии жизненного цикла изделий и материалов.

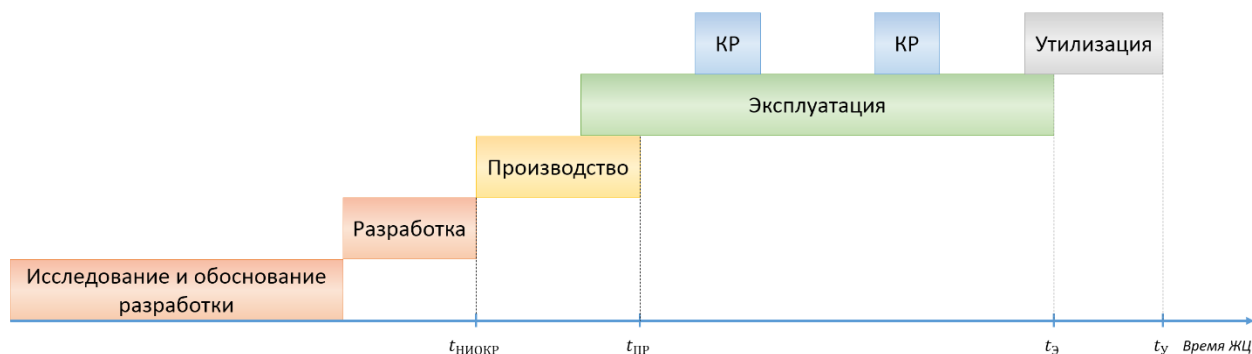


Рисунок 1 – Типовой ЖЦ ВВТ

Результатом работ на данной стадии является научно-техническое обоснование возможности и целесообразности создания изделий, проект тактико-технического (технического) задания на выполнение опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию (модернизации) изделия.

На стадии разработки выполняется ОКР по созданию (модернизации) изделия.

На этапе ОКР разрабатываются эскизный и технический проекты, реализующие конструктивно и технологически обоснованный в техническом задании облик будущего образца. Результатом ОКР является рабочая конструкторская и технологическая документация, изготовление опытных образцов, их предварительные и государственные испытания на соответствие требованиям технического задания.

Стадия производства включает в себя этапы технологической подготовки производства, организацию серийного производства и поставку образцов ВВТ заказчику. В процессе серийного производства отрабатывается вся необходимая эксплуатационно-техническая документация (формуляры и паспорта на изделия, руководства по техническому обслуживанию и ремонту, ведомости запасного имущества и принадлежностей (ЗИП), технологические карты выполнения работ и др.), изготавливаются комплекты необходимых средств технического обслуживания и ремонта ВВТ в войсках.

Стадия эксплуатации ВВТ включает в себя их приемку (ввод) в эксплуатацию, приведение в готовность и ее поддержание, использование по назначению, хранение (кратковременное и длительное) в процессе эксплуатации, техническое обслуживание, текущий и средний ремонт, обеспечение эксплуатации.

В процессе эксплуатации изготовитель осуществляет авторский надзор за эксплуатацией ВВТ в войсках, гарантийный ремонт отказавших изделий, выполнение капитального ремонта изделий, выработавших межремонтный ресурс, проведение доработок по устранению замечаний заказчика, поставку ЗИП в войсковые части.

Мероприятия по прекращению эксплуатации ВВТ проводятся вследствие его морального и физического устаревания, выведения из эксплуатации на основе международных договоров или выработки установленных показателей: надежности, назначенных ресурса, срока службы (хранения) и других.

После прекращения эксплуатации ВВТ подлежит утилизации, которую осуществляет предприятие-изготовитель, или уничтожению.

Стадия капитального ремонта ВВТ охватывает процессы выполнения работ по разработке конструкторской и технологической ремонтной документации, приемки ВВТ в ремонт, их опытного ремонта, проведение предварительных и приемочных испытаний опытных ремонтных образцов, подготовки и освоения ремонтного производства, ведения заданного типа ремонтного производства (единичное, серийное, массовое) и поставки отремонтированных изделий эксплуатирующим организациям заказчика.

Посредством капитального ремонта осуществляется технически возможное и экономически целесообразное восстановление параметров и характеристик изделий, изменяющихся при эксплуатации, для продолжения их использования по прямому назначению.

Продолжительность этапов ЖЦ зависит от типа и характеристик образца ВВТ, условий его разработки, производства и эксплуатации, уровня научно-технических разработок и возможностей оборонной промышленности, уровня финансирования оборонных расходов и других военно-технических и экономических факторов.

Из анализа содержания ЖЦ следует, что он состоит из трех групп процессов: проектно-исследовательский, производственно-технологический и эксплуатационный [3].

Проектно-исследовательский процесс представлен первыми двумя стадиями ЖЦ: «Исследование и обоснование разработки», «Разработка». Его продолжительность составляет примерно 10-15% продолжительности ЖЦ.

Производственно-технологический процесс включает опытное и серийное производство ВВТ, а также средний и капитальный ремонт ВВТ на предприятиях промышленности и сервисных центрах. Продолжительность серийного производства составляет 20-30% продолжительности ЖЦ.

Процесс эксплуатации является самым продолжительным этапом ЖЦ. Он составляет 60-70% продолжительности ЖЦ.

Таким образом, ЖЦ ВВТ представляет собой сложный производственно-технологический процесс, сопровождаемый научно-техническими, финансово-экономическими и административно-правовыми механизмами регулирования.

Каждый из составляющих его процессов протекает во времени, характеризуется наличием различного рода неопределенностей и случайностей, влияющих на динамику и результаты его реализации. В наибольшей степени такой особенностью обладает проектно-исследовательский процесс, представляющий собой интеллектуальный творческий процесс с высокой долей эвристики, основанный на фундаментальных научных знаниях и опыте научно-исследовательской и инженерно-конструкторской деятельности специалистов. Смоделировать такой процесс возможно только на базе искусственного интеллекта, что само по себе является сложной научно-технической проблемой.

Не менее сложным и проблемным представляется моделирование производственно-технологического процесса, на который оказывают влияние технологические, эргономические, правовые, экономические факторы, социальные и психологические аспекты деятельности специалистов в процессе производства.

Именно в силу сложности процессов, составляющих ЖЦ разработки, производства и эксплуатации промышленной продукции, в том числе продукции военного назначения, наши возможности по моделированию не позволяют в полной мере решить задачу создания системы управления ЖЦ ВВТ.

Из анализа характера процессов ЖЦ ВВТ следует, что их основу составляют управляемые дискретно-непрерывные случайные процессы. Именно эти процессы широко используются при моделировании логистических процессов различного назначения. Из этого класса процессов следует выделить подкласс полумарковских процессов как

наиболее простых и в достаточной степени адекватных реальным процессам [6; 7; 10; 11].

Полумарковский процесс представляет собой стохастический процесс изменения дискретных состояний некоторой системы во времени, длительность пребывания в которых является случайной с произвольным законом распределения, а переходы из одного состояния в другие осуществляется мгновенно с определенными вероятностями. Процесс обладает марковским свойством отсутствия последействия по моментам перехода.

Рассмотрим применение полумарковских процессов к моделированию процесса разработки и производства образца ВВТ.

2. Полумарковская модель процесса разработки и производства образца ВВТ

Полумарковский процесс может быть описан графом $G(A, V, P)$, где множество узлов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ определяют состояния процесса; множество дуг $V = \{V_{ij}\}_{m \times m}$ – направления переходов процесса из одного состояния в другое, где $V_{ij} = 1$, если переход $A_i \rightarrow A_j$ возможен и $V_{ij} = 0$, если данный переход невозможен. Переходы в различные состояния задаются матрицей вероятностей переходов $\Pi(t) = \{\pi_{ij}(t)\}_{m \times m}$, где $\pi_{ij}(t) = P(V_{ij} = 1 \mid \tau_i < t)$ – условная вероятность перехода $A_i \rightarrow A_j$ за время t , τ_i – случайное время пребывания процесса в состоянии A_i с известным законом распределения [10].

Вероятности переходов удовлетворяют условию нормировки:

$$\forall i, \sum_{j=1}^m \pi_{ij}(t) = 1.$$

Переходы из одного состояния в другое происходят с вероятностями $p_{ij}(t)$. Вероятности переходов могут зависеть не только от времени пребывания в данном состоянии, но также от управляющих воздействий $u_i \in U$ внешнего регулятора:

$$\pi_{ij}(t) = P(V_{ij} = 1; u_i \mid \tau_i < t),$$

где $U = \{u_i\}$ – конечное множество управлений.

Длительность ЖЦ образца ВВТ составляет сумму длительностей этапов НИР, ОКР, производства и эксплуатации:

$$T_{\text{ЖЦ}} = \tau_{\text{НИР}} + \tau_{\text{ОКР}} + \tau_{\text{ПР}} + \tau_{\text{Э}}.$$

Длительности этих этапов и ЖЦ в целом являются случайными, поскольку процессы разработки ВВТ связаны, как отмечалось выше, с воздействием целого ряда случайных и неопределенных факторов. Таким образом, готовность образца к его использованию характеризуется некоторой вероятностью.

Рассмотрим пример применения полумарковских процессов к моделированию процесса создания некоторого образца ВВТ.

Представим процесс создания некоторого образца ВВТ в виде последовательности состояний, представленной на рисунке 2.

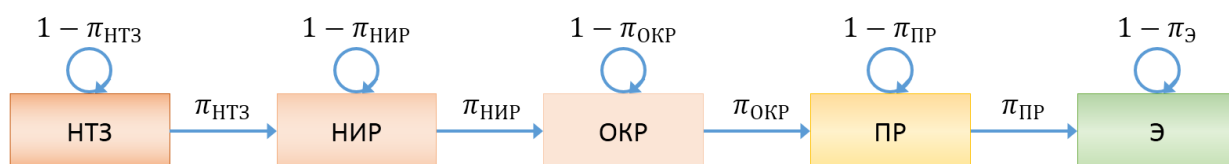


Рисунок 2 – Граф проектного процесса создания образца ВВТ

Начальное состояние проекта определяется научно-техническим заданием (НТЗ), а конечное – началом эксплуатации образца ВВТ. Переходы в различные состояния осуществляются с вероятностями $\pi_{ij}(t)$ в дискретные моменты времени $t = 1, 2, \dots, T$.

Выпишем систему уравнений для вероятностей состояния процесса согласно представленному на рисунке 2 графу:

$$\begin{aligned} P_{\text{НТЗ}}(t + 1) &= (1 - \pi_{\text{НТЗ}})P_{\text{НТЗ}}(t); \\ P_{\text{НИР}}(t + 1) &= \pi_{\text{НТЗ}}P_{\text{НТЗ}}(t) + (1 - \pi_{\text{НИР}})P_{\text{НИР}}(t); \\ P_{\text{ОКР}}(t + 1) &= \pi_{\text{НИР}}P_{\text{НИР}}(t) + (1 - \pi_{\text{ОКР}})P_{\text{ОКР}}(t); \\ P_{\text{ПР}}(t + 1) &= \pi_{\text{ОКР}}P_{\text{ОКР}}(t) + (1 - \pi_{\text{ПР}})P_{\text{ПР}}(t); \\ P_{\text{Э}}(t + 1) &= \pi_{\text{ПР}}P_{\text{ПР}}(t) + (1 - \pi_{\text{Э}})P_{\text{Э}}(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $P_{\text{НТЗ}}(t) + P_{\text{НИР}}(t) + P_{\text{ОКР}}(t) + P_{\text{ПР}}(t) + P_{\text{Э}}(t) = 1, t = 1, 2, \dots, T$.

Исходными данными модели являются условные вероятности переходов $\pi_{ij}(t)$ с заданными значениями и начальные значения вероятностей состояния процесса.

На рисунке 3 представлены зависимости вероятностей реализации этапов проекта от времени при заданных вероятностях переходов:

$$\pi_{\text{НТЗ}}(t) = 0,8; \pi_{\text{НИР}}(t) = 0,7; \pi_{\text{ОКР}}(t) = 0,65; \pi_{\text{ПР}}(t) = 0,5; \pi_{\text{Э}}(t) = 0$$

и начальных значениях вероятностей переходов:

$$P_{\text{НТЗ}}(0) = 0,5; P_{\text{НИР}}(0) = 0,15; P_{\text{ОКР}}(0) = 0,15; P_{\text{ПР}}(0) = 0,15; P_{\text{Э}}(0) = 0,05.$$

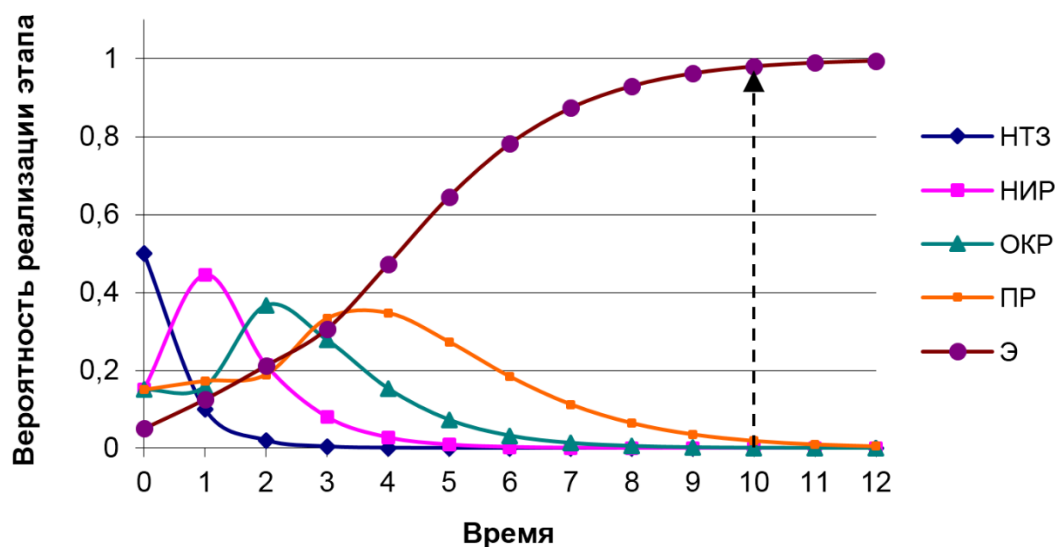


Рисунок 3 – Динамика вероятностей реализации этапов проекта

Эти параметры характеризуют уровень научно-технического задела и производственно-технологических возможностей для реализации проекта.

Итоговая функция $P_{\text{Э}}(t)$ характеризует вероятность реализации проекта к моменту времени t .

Из приведенного рисунка видно, что за время $T = 10$ лет проект реализуется практически достоверно ($P_{\text{Э}}(t) = 0,98$). При этом среднее время реализации проекта составляет $\bar{T} = \sum_{i=1}^{10} [1 - P_{\text{Э}}(t)] \approx 4,7$ года.

Таким образом, для задания полумарковского процесса необходимо задать матрицу вероятностей одношаговых переходов $\Pi(t) = \{\pi_{ij}(t)\}_{m \times m}$ и вектор вероятностей его начальных состояний $P(0) = \{P_i(0)\}_{m \times 1}$.

Дальнейшая эволюция полумарковского процесса описывается матричным уравнением:

$$P(t + 1) = \Pi P(t), t = 0, 1, 2, \dots, T. \quad (2)$$

По своему виду функция $P_3(t)$ напоминает *логистическую* функцию, которая широко используется в качестве моделей рабочих процессов в экономике, производстве, технике [7; 8; 12-14].

Рассмотрим методический подход к описанию динамики ЖЦ образцов ВВТ с использованием логистических функций вместо классической модели полумарковского процесса (1), что позволит в значительной степени упростить моделирование ЖЦ ВВТ.

Типичная логистическая модель описывается следующим дифференциальным уравнением для вероятности готовности продукта [12; 14]:

$$\frac{dp}{dt} = \vartheta p(1 - p); P(0) = p_0, t \geq 0, \quad (3)$$

где $\vartheta(t)$ – интенсивность (темп) создания продукта;
 p_0 – начальный уровень готовности продукта, определяемый уровнем научно-технического и технологического задела.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1 - p_0)e^{-\int_0^t \vartheta(\tau) d\tau}}. \quad (4)$$

При постоянном темпе развития продукта ($\vartheta = const$) уравнение (4) принимает более простой вид:

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1 - p_0)e^{-\vartheta t}}. \quad (5)$$

На рисунке 4 представлены графики готовности продукта с постоянным темпом $\vartheta = 0,5$ 1/год, но с разным начальным уровнем готовности $p_0 = 0,2$.

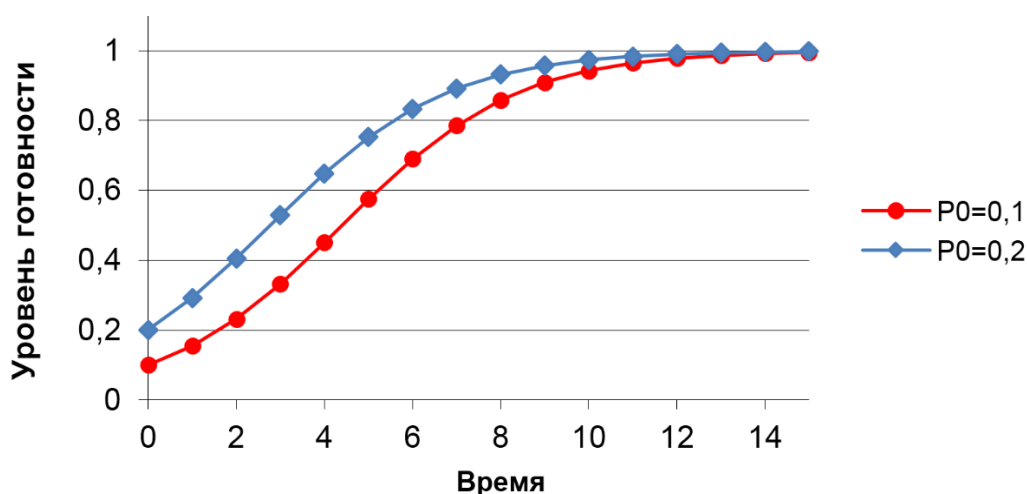


Рисунок 4 – Логистические функции готовности продукта

Задавая гарантированный уровень готовности продукта γ , из уравнения (5) можно определить необходимое время для его создания. Из равенства:

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1 - p_0)e^{-\vartheta t}} = \gamma$$

получаем время готовности продукта с заданным уровнем:

$$t_\gamma = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)}{\vartheta}. \quad (6)$$

Можно задать требуемое время готовности продукта t^γ и найти необходимый темп выполнения проектных работ

$$\vartheta = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)}{t^\gamma}. \quad (7)$$

Динамика выполнения проектных работ зависит от стратегии их ресурсного обеспечения. В работе [14] исследованы основные стратегии ресурсного обеспечения и связанная с ними динамика готовности продукта к его использованию. В предположении, что темп $\vartheta(t)$ создания продукта пропорционален скорости потока $c(t)$ ресурсов в стоимостном измерении:

$$\vartheta(t) = kc(t), \quad (8)$$

где $c(t) = \frac{dc(t)}{dt}$ – скорость потока ресурсов во времени,

$k > 0$ – коэффициент пропорциональности, получены различные зависимости для вероятности выполнения проектов.

На рисунке 5 показаны графики логистических функций готовности продукта при различных стратегиях ресурсного обеспечения [14].

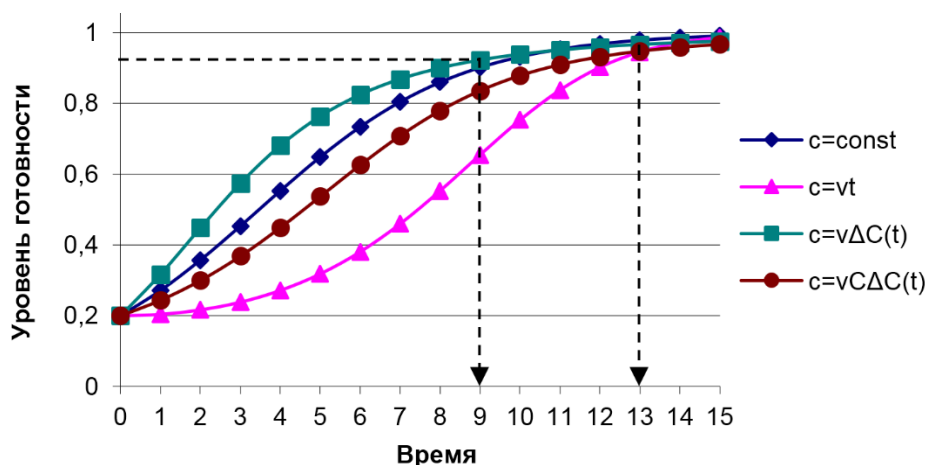


Рисунок 5 – Логистические функции развития продукта при различных стратегиях ресурсного обеспечения

Для каждого этапа реализации проекта при заданном времени его выполнения τ_i и известном ресурсном потоке $c_i(t)$ для его обеспечения по формулам (5), (8) нетрудно рассчитать вероятность готовности проекта $p_i(t_i)$ к моменту окончания этапа i :

$$p_i(t_i) = \frac{p_{i-1}}{p_{i-1} + (1-p_{i-1})e^{-k_i c_i t_i}}, i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

где p_{i-1} – уровень готовности проекта, достигнутый на предыдущем этапе, и время его перехода на следующий этап

$$t_i = t_{i-1} + \tau_i.$$

Если принять, что финансирование проекта на каждом этапе осуществляется с постоянным темпом, то из формулы (6) получаем требуемую длительность этапа разработки с заданной надежностью:

$$\tau_i^y = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma_i)p_{i-1}}{\gamma_i(1-p_{i-1})}\right)}{k_i c_i}, i = \overline{1, m}.$$

При достижении уровня реализации проекта $p(t_i) \geq p_i^y$ процесс разработки переходит к последующему этапу. Если $p(t_i) < p_i^y$, то процесс разработки на данном этапе продолжается либо возвращается на предшествующий этап проектных работ. Практика проектных работ свидетельствует, что при недостаточной проработке начальных этапов проекта сроки ОКР существенно увеличиваются, а в ряде случаев ОКР приостанавливается для подготовки необходимого научно-технического задела (НТЗ) и корректировки принятых концептуальных решений.

С помощью логистической модели (5), (6) можно для каждого этапа реализации проекта задать продолжительность τ_i , темп ϑ и рассчитать вероятность реализации $p_i(t_i)$.

После закупки образца ВВТ в течение некоторого времени $t_{0Э}$ осуществляется его опытная эксплуатация, в течение которой изготовитель занимается устранением за свой счет выявленных недостатков и гарантийным обслуживанием образца ВВТ. После прохождения этапа опытной эксплуатации начинается этап войсковой эксплуатации образца ВВТ. В этот период изготовитель осуществляет технический надзор за правильностью, полнотой и качеством проведения работ по его техническому обслуживанию. Через определенное время или после определенной наработки образец ВВТ подвергается профилактическому или вос-

становительному ремонту, который выполняется силами изготовителя либо с привлечением войсковых специалистов. Этап войсковой эксплуатации продолжается до момента снятия образца ВВТ со снабжения либо по истечении технического ресурса, либо по другим соображениям.

В процессе эксплуатации происходит постепенное снижение уровня готовности образца ВВТ в силу воздействия различных деструктивных факторов (износа и отказов составных частей, повреждений из-за ошибок личного состава и пр.). Интенсивность таких воздействий со временем увеличивается и наступает момент достижения предельного срока эксплуатации, после чего образец снимается со снабжения и направляется на утилизацию. Предельный срок эксплуатации устанавливается в процессе разработки образца ВВТ и контролируется изготовителем в течение времени его эксплуатации.

С учетом сказанного возникает задача управления продолжительностью этапов ЖЦ образца для обеспечения заданного уровня его готовности при минимальных затратах. Управляющим параметром в этой задаче выступают затраты на реализацию определенного этапа ЖЦ и скорость их потока.

Обозначим $C(t_{ЖЦ}) = \sum_{i=1}^m C_i(\tau_i)$ – суммарные затраты на реализацию m этапов (НИЭР, ОКР, ПР, Э) ЖЦ образца ВВТ; $t_{ЖЦ} = \sum_{i=1}^m \tau_i$ – общую продолжительность ЖЦ.

Готовность образца ВВТ, достигаемая на определенном этапе ЖЦ, помимо его продолжительности зависит от интенсивности выполнения проектных работ, связанной со скоростью поступления ресурсов, и уровня готовности проекта, достигнутого на предыдущем этапе.

Это дает возможность сформулировать обратную задачу динамики для рассматриваемого проектного процесса.

Для заданных уровня готовности проекта на момент закупки $P(t_m) = p_m$ и продолжительностей этапов разработки образца ВВТ τ_i , ($i = \overline{1, m}$) определить дифференциальные затраты c_i , обеспечивающие минимум общих затрат на создание образца ВВТ:

$$C(t_m) = \sum_{i=1}^m c_i \tau_i \rightarrow \min_{c_i, i=\overline{1, m}}; t_m = \sum_{i=1}^m \tau_i; P(t_m) = p_m; P(0) = p_0;$$

$$c_i = - \frac{\ln \left(\frac{p_{i-1}(1-p_i)}{p_i(1-p_{i-1})} \right)}{k_i \tau_i}, i = \overline{m, 1}. \quad (10)$$

Для решения данной задачи используется метод динамического программирования [15]. Уравнение Беллмана для суммарных затрат имеет вид:

$$C(t_n) = \min_{c_i, i=1, n} \sum_{i=1}^n c_i \tau_i = \left[C(t_n - \tau_n) + \min_{c_n} (c_n \tau_n) \right]; \tau_n = -\frac{1}{k_n c_n} \ln \left(\frac{p_{n-1}(1-p_n)}{p_n(1-p_{n-1})} \right),$$

где $n = \overline{m, 1}$ – номер шага.

Алгоритм метода динамического программирования реализуется по шагам.

Шаг 1. На момент закупки t_3 образца ВВТ задается уровень его готовности $P(t_3) = p_3$. Далее рассчитываются потребные затраты ресурсов на производство ВВТ в течение времени $\tau_{\text{ПР}}$:

$$C_{\text{ПР}}(\tau_{\text{ПР}}) = c_{\text{ПР}} \tau_{\text{ПР}} = -\frac{1}{k_{\text{ПР}}} \ln \left(\frac{p_{\text{ОКР}}(1-p_3)}{p_3(1-p_{\text{ОКР}})} \right). \quad (11)$$

Они зависят от коэффициента затрат $k_{\text{ПР}}$ в будущий момент времени. Поскольку момент закупки t_3 является прогнозным, то расчет будущего коэффициента затрат $k_{\text{ПР}}$ необходимо производить с учетом роста цен и изменения рыночной конъюнктуры. Для расчета может быть использована формула роста будущих затрат [16]:

$$k_{\text{ПР}}^*(t_3) = k_{\text{ПР}}(0)(1 + E)^{t_m}, \quad (12)$$

где E – прогнозируемая величина инфляции.

По этим данным с использованием формулы (8) рассчитывается темп производства:

$$\vartheta_{\text{ПР}} = k_{\text{ПР}}^* \frac{c_{\text{ПР}}}{\tau_{\text{ПР}}}.$$

Шаг 2. Из формулы (9) получаем выражение для расчета уровня готовности образца ВВТ на момент завершения ОКР:

$$p_{\text{ОКР}} = \frac{p_{\text{ПР}}}{p_{\text{ПР}} + (1-p_{\text{ПР}})e^{-k_{\text{ПР}}^* c_{\text{ПР}}}}. \quad (13)$$

Далее повторяется расчет по схеме шага 1 для этапов ОКР и НИЭР.

Шаг 3. На этапе НИР готовность образца зависит от уровня готовности НТЗ

$$p_{\text{НИР}} = \frac{p_{\text{НТЗ}}}{p_{\text{НТЗ}} + (1-p_{\text{НТЗ}})e^{-k_{\text{НИР}} c_{\text{НИР}}}}. \quad (14)$$

Поэтому необходимо задать этот уровень готовности и далее последовательно по формулам (9), (11) рассчитать показатели готовности образца ВВТ и затраты на остальных этапах ЖЦ.

В результате для каждого этапа получаем оптимальную последовательность объемов финансирования $\frac{C_{НИР}}{\tau_{НИР}}, \frac{C_{ОКР}}{\tau_{ОКР}}, \frac{C_{ПР}}{\tau_{ПР}}$, обеспечивающую минимальный общий объем затрат для получения заданного уровня готовности образца ВВТ к моменту времени его использования.

На практике не всегда можно точно спланировать продолжительность того или иного этапа создания образца ВВТ. В этом случае можно использовать факт наличия приближенно линейной зависимости между объемами финансирования и продолжительностью разработок продукта:

$$\frac{C_i(\tau_i)}{\tau_i} \approx const.$$

В этом случае из соотношения $\frac{C_i(\tau_i)}{\tau_i} \approx \frac{C_j(\tau_j)}{\tau_j}$ получаем приближенную оценку для продолжительности определенного этапа разработки в зависимости от уровня его финансирования

$$\tau_i \approx \frac{C_i(\tau_i)}{C_{ВВТ}(t_3)} t_3,$$

где $C_{ВВТ}(t_3) = C_{НИР}(\tau_{НИР}) + C_{ОКР}(\tau_{ОКР}) + C_{ПР}(\tau_{ПР})$ – суммарные затраты на изготовление образца ВВТ.

Рассмотрим пример, демонстрирующий работоспособность изложенной выше модели управления разработкой некоторого образца ВВТ.

В таблице 1 представлены данные по продолжительности и темпу этапов разработки, производства и опытной эксплуатации (ОЭ) образца ВВТ, коэффициенты затрат для каждого этапа.

Таблица 1 – Значения показателей этапов ЖЦ

Показатели	Этап					
	НТЗ	НИР	ОКР	ПР	ОЭ	Итого
Продолжительность τ , год	–	2,0	4,0	2,0	2,0	10
Темп разработки ϑ , 1/год	–	0,81	0,65	0,66	0,67	
Готовность образца p	0,05	0,21	0,78	0,93	0,98	0,98
Относительные затраты δ_i на финансирование этапа	5,0	0,9	7,5	11,1	2,0	26,5

По приведенной выше методике произведен расчет показателей готовности образца ВВТ к окончанию каждого из этапов и относительные затраты на их реализацию, которые также приведены в таблице 1.

Относительные затраты δ_i на финансирование этапов рассчитывались из условия пропорциональности:

$$\delta_i = \frac{\vartheta_i \tau_i}{\sum_{i=1}^m \vartheta_i \tau_i}$$

На рисунке 6 представлен график динамики готовности образца ВВТ на различных этапах. Реперные точки, соответствующие завершению этапов, выделены синим цветом.

В рассматриваемом примере образец ВВТ поставляется в эксплуатацию с уровнем готовности 98% с последующей гарантийной технической поддержкой производителя.

На рисунке 7 представлена диаграмма распределения относительных затрат δ_i на финансирование этапов работ.

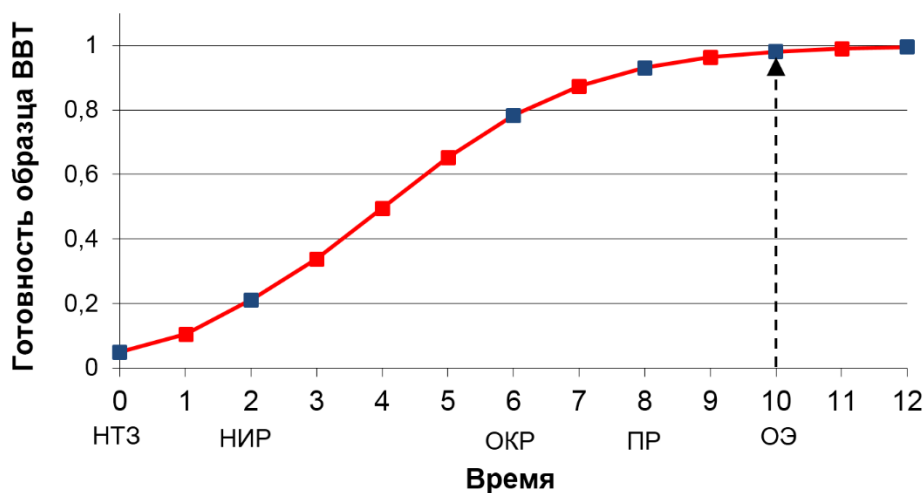


Рисунок 6 – Динамика готовности образца ВВТ

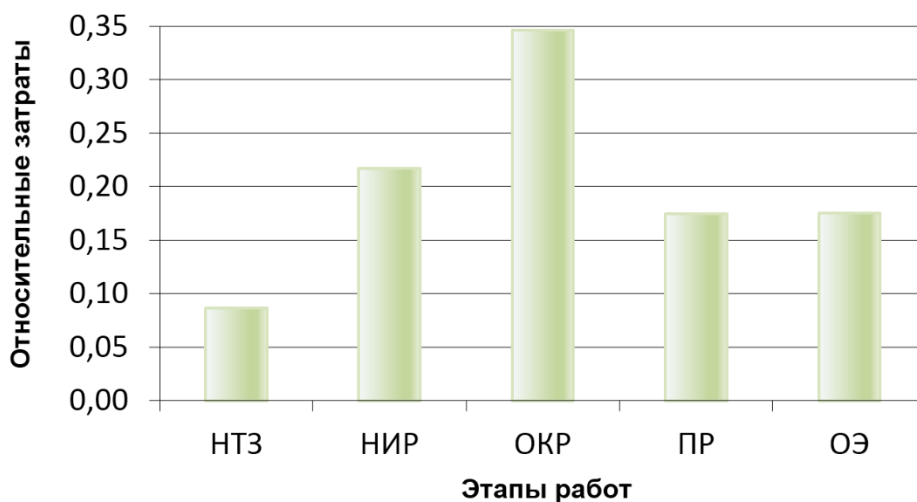


Рисунок 7 – Относительные затраты на финансирование этапов работ

Как отмечалось выше, в процессе эксплуатации образца ВВТ происходит постепенное снижение его готовности (исправности). Для поддержания требуемого уровня готовности периодически производятся техническое обслуживание, текущий и восстановительный ремонт.

3. Полумарковская модель эксплуатации образца ВВТ

Рассмотрим модель изменения уровня готовности образца ВВТ в процессе эксплуатации. Под действием потока отказов с интенсивностью $\lambda(t)$ образец ВВТ с определенной вероятностью $p(t)$ переходит в неисправное состояние и подлежит текущему ремонту. Текущий ремонт выполняется силами специалистов войсковых частей или с привлечением специалистов сервисного центра предприятия-изготовителя. Среднее время текущего ремонта, как правило, значительно меньше интервала наблюдения за техническим состоянием изделия. Поэтому можно считать, что текущий ремонт выполняется мгновенно. При текущем ремонте восстанавливается только работоспособность изделия, т.е. происходит компенсация действия потока внезапных отказов [3; 11].

С течением времени интенсивность отказов непрерывно увеличивается, что связано со старением и износными явлениями. В прикладных задачах часто используется линейная зависимость интенсивности потока отказов от времени [14; 16]:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t, \quad (15)$$

где λ_0 – интенсивность внезапных отказов изделия;
 α – скорость нарастания интенсивности постепенных отказов.

Составляющие интенсивности отказов λ_0, α зависят от условий и режимов эксплуатации и являются паспортными характеристиками изделия².

В целях профилактики и снижения действия постепенных отказов периодически проводится восстановительный ремонт. Данный ремонт предполагает устранение причин, вызывающих постепенные отказы. Он включает в себя диагностику технического состояния, профилактические замены составных частей, регулировочные и наладочные работы. Восстановительный ремонт осуществляется силами сервисных центров

² В паспорте изделия указываются средние наработки до отказа в различных условиях и режимах эксплуатации, по которым можно рассчитать параметры λ_0, α .

предприятий-изготовителей, при этом восстановление ВВТ осуществляется до максимального уровня его готовности.

Рассмотрим вначале динамику изменения показателя готовности под действием потока отказов без восстановления изделия. Показатель готовности изделия при сохранении им работоспособного состояния имеет вид:

$$p(t) = p_0 e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} = p_0 e^{-(\lambda_0 t - \frac{\alpha t^2}{2})}, \quad (16)$$

где $p_0 \leq 1$ – начальный уровень готовности изделия.

Представим показатель готовности изделия как произведение начального уровня готовности p_0 и вероятностей сохранения работоспособного состояния изделия под воздействием внезапных $p_{\text{ВО}}(t) = e^{-\lambda_0 t}$ и постепенных $p_{\text{ПО}}(t) = e^{-\frac{\alpha t^2}{2}}$ отказов:

$$p(t) = p_0 p_{\text{ВО}}(t) p_{\text{ПО}}(t).$$

В практике эксплуатации такое разделение практически невозможно, поскольку отказ изделия проявляется во времени как случайное событие без признаков причинности. Однако для математического описания механизма восстановления работоспособности изделия при отказе такое представление вполне оправдано.

Если текущий ремонт производится сразу же после проявления отказа путем замены отказавшего элемента (составной части) изделия на новый, то в этом случае устраняется последствие, связанное с действием внезапных отказов. В результате после текущего ремонта получаем $p_{\text{ВО}}(t) = 1$ и показатель готовности изделия становится равным $p(t) = p_0 p_{\text{ПО}}(t)$.

При проведении восстановительного ремонта в момент $t_{\text{МР}}$ устраняются последствия как внезапных отказов, так и причины появления и накопления постепенных отказов (износ, старение, разрегулировка). При этом готовность изделия восстанавливается до уровня $p(t) = p_0$. Поскольку текущий и восстановительный ремонты имеют существенно меньшую продолжительность по сравнению с межремонтным интервалом, то восстановление изделия можно считать практически мгновенным.

Окончательное выражение для расчета показателя готовности образца ВВТ в процессе эксплуатации имеет вид:

$$p(t) = \begin{cases} p_0 e^{-\frac{\alpha t^2}{2}}, & t \neq t_{\text{МР}} \\ p_0, & t = t_{\text{МР}} \end{cases}. \quad (17)$$

Таким образом, за счет выполнения ремонтов происходит восстановление (регенерация) технического состояния и готовности образца ВВТ [16].

На рисунке 8 представлена динамика уровня готовности образца ВВТ (абсолютной и средней) с параметрами эксплуатации $p_0 = 1$, $\alpha = 0,031/\text{год}^2$, $t_{MP} = 5$ лет.

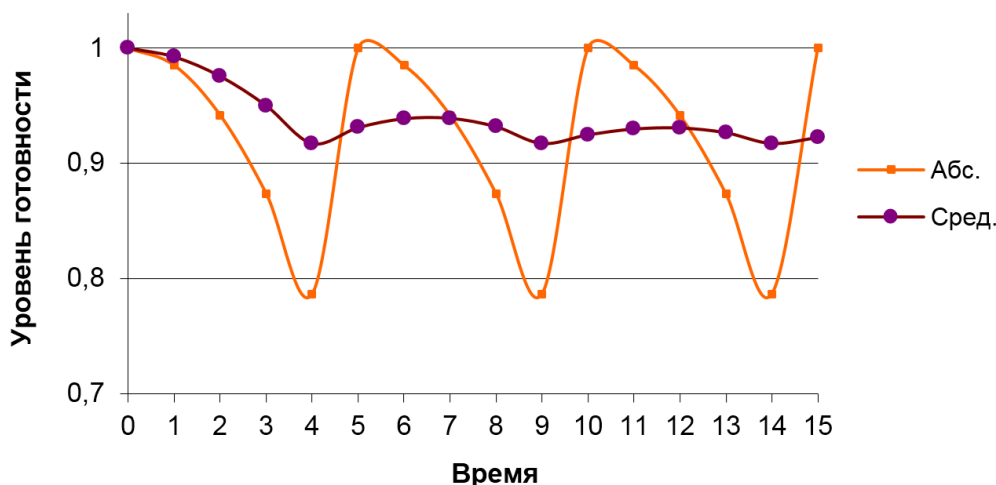


Рисунок 8 – Динамика готовности образца ВВТ в процессе эксплуатации

Восстановление технического состояния и готовности изделия требует соответствующих затрат материальных ресурсов. Эти затраты включают в себя:

- годовые затраты на содержание образцов ВВТ на технических позициях, проведение контрольно-технических смотров и проверок, подготовку к применению C_C ;

- стоимость текущего $C_{ТР}$ и восстановительного $C_{ВР}$ ремонта образцов ВВТ.

Исходя из теории и практики технико-экономического анализа ВВТ, примем следующие допущения относительно методики расчетов технико-экономических параметров ВВТ [4; 14]:

- годовая стоимость эксплуатации и ремонта образца ВВТ пропорциональна первоначальной стоимости закупки и подвержена инфляционным изменениям $C_Э = k_Э C_З$; $C_Р = k_Р C_З$;

- инфляционные изменения цен учитываются дефлятором

$$d(t) = (1 + E)^t,$$

где E – нормативный уровень годовой инфляции.

В этом случае затраты на эксплуатацию образца ВВТ за время t составят:

$$C_3(t) = d(t)(C_C t + C_{ТР} \lambda_0 t + C_{БР} \frac{t}{t_{MP}}) = d(t)(C_C + \frac{C_{ТР}}{T_0} + \frac{C_{БР}}{t_{MP}})t, \quad (18)$$

где $T_0 = \frac{1}{\lambda_0}$ – средняя наработка образца до отказа.

Периодичность восстановительных ремонтов t_{MP} устанавливается из условия обеспечения заданной готовности образца ВВТ:

$$p_0 e^{-\frac{\alpha t^2}{2}} \geq p_{зад},$$

откуда получаем:

$$t_{MP} = \sqrt{-\frac{2}{\alpha} \ln\left(\frac{p_{зад}}{p_0}\right)}. \quad (19)$$

Критерием остановки процесса эксплуатации образца может служить превышение эксплуатационных затрат стоимости закупки C_3 нового образца ВВТ [3; 11; 16]:

$$C_3(t) \geq C_3. \quad (20)$$

Из неравенства (17) определяется предельный срок службы образца ВВТ по экономическому критерию:

$$t_{CC} = \frac{C_3}{dt(C_C + \lambda_0 C_{ТР} + \frac{C_{БР}}{t_{MP}})}. \quad (21)$$

Рассмотрим пример расчета технико-экономических параметров этапа эксплуатации образца ВВТ, исходные данные которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета технико-экономических параметров

Наименование характеристики образца ВВТ	Значение характеристики
Интенсивность внезапных отказов λ_0 , 1/год	0,12
Параметр скорости постепенных отказов α , 1/год ²	0,003
Относительная стоимость годового содержания C_C/C_3	0,01
Относительная стоимость текущего ремонта $C_{ТР}/C_3$	0,05
Относительная стоимость восстановительного ремонта $C_{БР}/C_3$	0,2
Заданный уровень готовности образца ВВТ $p_{зад}$	0,9
Нормативный уровень годовой инфляции E	0,06

На рисунке 9 представлен график изменения относительных эксплуатационных затрат $\frac{C_3(t)}{C_3}$, рассчитанных по изложенной выше методике.

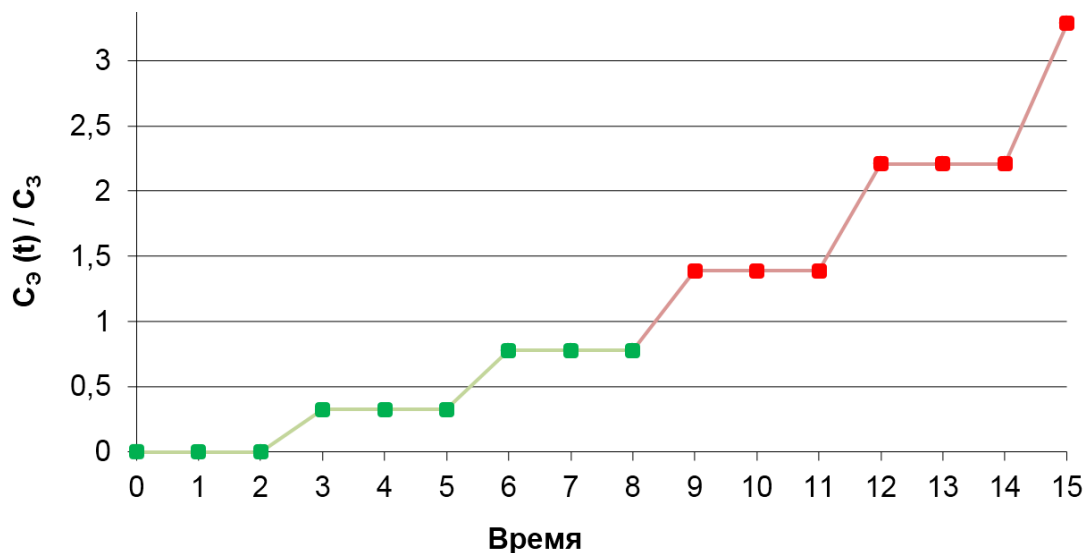


Рисунок 9 – Динамика затрат на эксплуатацию образца ВВТ

Из этого графика видно, что через 9 лет эксплуатационные затраты превысят стоимость закупки образца ВВТ и возникнет вопрос об экономической целесообразности продолжения его эксплуатации.

Заключение

Рассмотренный научно-методический аппарат может быть использован в задачах программно-целевого планирования при обосновании вариантов государственной программы вооружения, мероприятий по техническому оснащению войск ВВТ, организации технической эксплуатации ВВТ в войсках. Достоинством предлагаемых математических моделей является сочетание их простоты и достаточно высокой адекватности реальным процессам, а также наличие исходных данных, используемых в практической деятельности для их реализации.

Список использованных источников

1. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе / Под. ред. В.М. Буренка. М.: Издательская группа «Граница», 2013. 520 с.
2. Буренок В.М. Проблемы создания системы управления полным жизненным циклом вооружения, военной и специальной техники // Вооружение и экономика. 2014. №2(27).
3. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники. М.: Издательская группа «Граница», 2015. 315 с.
4. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Хрусталеv Е.Ю. Механизм управления производством продукции военного назначения. М.: Наука, 2006. 303 с.
5. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. М.: Издательский дом «МДМ», 2003.
6. Шаламов А.С. Вероятностные аналитические модели интегрированной логистической поддержки продукции // Качество и ИПИ (CALS) –технологии, 2004. №3.
7. Шаламов А.С. Интегрированная логистическая поддержка наукоемкой продукции. М.: Университетская книга, 2008. 464 с.
8. Хрусталеv Е.Ю., Хрусталеv О.Е. Моделирование жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции // Экономический анализ: теория и практика. 2012. №16(271).
9. Ключков В.В., Дутов А.В. Модель управления прикладными исследованиями и разработками в наукоемкой промышленности // Экономический анализ: теория и практика. 2020. № 35(290).
10. Сильверстов А.Н. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний. М.: Советское радио, 1980. 272 с.
11. Буравлев А.И., Доценко Б.И., Казаков И.Е. Управление техническим состоянием динамических систем / Под общ. ред. И.Е. Казакова. М.: Машиностроение, 1995. 240 с.
12. Лебедев В.В., Лебедев К.В. Математическое и компьютерное моделирование экономики. М.: НВТ-Дизайн, 2002. 256 с.
13. Поздняков А.И. Система общих закономерностей развития военной техники как основа определения приоритетов в военно-технической политике // Вооружение и экономика. 2013. №2(22).
14. Буравлев А.И. Модели управления ресурсным обеспечением проектов создания высокотехнологичной продукции // Вооружение и экономика. 2019. №4(50).
15. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Пер. с англ.; под ред. Б.С. Разумихина. М.: Наука, 1969.
16. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Пер. с нем.; под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.