

УДК 623-9

А.И. БУРАВЛЕВ, доктор
технических наук, профессор
М.С. БЕЛОРОЗОВ

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТЬЮ ВВСТ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ВООРУЖЕНИЯ

В статье рассмотрена модель управления технической готовностью неоднородного по возрасту парка изделий ВВСТ. В основе модели использована гипотеза о равномерной выработке технического ресурса и линейная зависимость интенсивности отказов от продолжительности и режимов эксплуатации ВВСТ. Исследована зависимость коэффициента технической готовности парка ВВСТ и затрат на его обеспечение при эксплуатации по ресурсу и техническому состоянию при разной возрастной структуре парка. Показано, что равномерная по возрасту структура парка ВВСТ является оптимальной по критерию «стоимость-готовность».

Ключевые слова: *техническая готовность изделий; управление технической готовностью парка ВВСТ по ресурсу и фактическому состоянию; возрастная структура парка ВВСТ; критерий оптимального управления «стоимость-готовность».*

Оснащение Вооруженных Сил Российской Федерации современным вооружением и военной техникой, обеспечение заданного уровня их технической готовности в войсках является одной из главных задач Государственной программы вооружения (ГПВ). Решение этой задачи предполагает получение актуальной и достоверной оценки о наличии ВВСТ в войсках, текущем уровне их исправности и прогноза динамики ее изменения по годам программного периода, оценки возможностей предприятий промышленности по выполнению восстановительного ремонта и обеспечению войск запасными частями и материалами для проведения войскового ремонта и технического обслуживания ВВСТ.

Исходная информация о техническом состоянии ВВСТ поступает в доводящие органы в сроки и объемах, установленных табелями срочных донесений видов и родов войск ВС РФ, главных и центральных управлений МО РФ.

Анализ существующей системы учета и представления данных о наличии и техническом состоянии образцов ВВСТ показывает, что она не обеспечивает актуальную поддержку исходных данных и имеет низкую достоверность. Степень расхождения в данных о наличии ВВСТ

доходит до нескольких единиц кораблей Военно-Морского Флота, воздушных судов, десятков единиц бронетанковой техники, сотен единиц ракетно-артиллерийского вооружения. Проверки технического состояния ВВСТ показывают, что представляемые данные и реальное состояние ВВТ совпадают порой лишь на 25-50%. При такой точности и надежности исходных данных текущие и прогнозные оценки имеют низкую достоверность, что неизбежно приводит к значительным ошибкам в принятии решений и дополнительным затратам ресурсов.

Выход из этой проблемной ситуации может быть только один – кардинальное улучшение системы учета, сбора и обработки исходных данных с периодичностью не менее квартала из войсковых частей тактического уровня (полк, бригада), далее агрегирование и обобщение этих результатов для войсковых соединений (бригада, дивизия, корпус) и объединений (корпус, армия) и, наконец, обобщение на уровне военных округов. Эти данные должны составлять единую базу для Министерства обороны Российской Федерации и Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, штабов видов и родов войск, центральных НИО.

В качестве альтернативы предлагается следующая схема системы информационного обеспечения ОВУ сведениями о техническом состоянии образцов ВВСТ (рисунок 1).

Техническая готовность ВВСТ является одним из определяющих показателей боевой готовности и боеспособности частей ВС РФ. Она определяется коэффициентом готовности $K_{\Gamma}(t)$ и характеризует вероятность нахождения образца ВВСТ в исправном (работоспособном) состоянии с учетом его восстановления. Боевой потенциал воинского формирования $P_{ВФ}$ определяется численностью образцов ВВТ, находящихся в списочном составе части $N_{ВВТ}$, их военно-техническим уровнем $K_{ВТУ}$ и коэффициентом готовности [1-3].

$$P_{ВФ} = K_{\Gamma} K_{ВТУ} N_{ВВТ}. \quad (1)$$

Таким образом, коэффициент технической готовности напрямую определяет уровень боевого потенциала воинского формирования.

Коэффициент технической готовности ВВСТ зависит от возраста образца (календарного срока службы t_{cc}), предельной наработки (технического ресурса T_p), безотказности (среднее время наработки до отказа τ_0) и восстанавливаемости (среднее время восстановления изделия τ_B).



Рисунок 1 – Система информационного обеспечения ОВУ сведениями о техническом состоянии образцов ВВСТ

В пределах заданного срока службы t_{cc} вследствие старения и износа интенсивность отказов в среднем возрастает, что приводит к необходимости профилактического и восстановительного ремонта, устраняющего накопление износных явлений. В теории и практике обеспечения надежности технических систем известны различные нелинейные зависимости интенсивности их отказов от продолжительности эксплуатации [4; 5]. В практических задачах чаще всего применяется либо постоянная $\lambda(t) = \lambda_0$, либо линейная зависимость интенсивности отказов от времени $\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t$, где λ_0 – интенсивность внезапных отказов; $\alpha \geq 0$ – скорость роста интенсивности постепенных отказов. Параметры этой модели можно определить по данным наблюдений в процессе эксплуатации изделий.

В практике войсковой эксплуатации ВВСТ широко используется принцип *равномерной* выработки технического ресурса, что позволяет рациональным образом планировать боевую подготовку, а также

периодичность проведения профилактических и восстановительных мероприятий по поддержанию требуемой надежности ВВСТ. В этом случае между текущей наработкой изделия и календарным временем имеет место линейная связь

$$\tau = \frac{T_P}{t_{CC}} t = \gamma t,$$

где $\gamma = \frac{T_P}{t_{CC}}$ – годовой расход технического ресурса.

В процессе эксплуатации изделие периодически находится в двух режимах: в режиме хранения (ожидания применения) и в режиме применения (боевой работы). При разработке и производстве образца ВВСТ для каждого режима закладываются соответствующие характеристики безотказности и сохраняемости: интенсивность отказов при хранении $\lambda_{ХР}$ и применении $\lambda_{ПР}$. Режим применения изделия по условиям эксплуатации является значительно более тяжелым. Поэтому интенсивность отказов в этом режиме существенно выше, чем в режиме хранения $\lambda_{ПР} > \lambda_{ХР}$. В тактико-технических требованиях к образцу ВВТ обычно задается определенный коэффициент соотношения между интенсивностями отказов при хранении и применении изделия

$$\lambda_{ПР} = k_{Э} \lambda_{ХР},$$

где $k_{Э} > 1$ – коэффициент эксплуатационной нагрузки.

Применение образца ВВСТ осуществляется в течение нескольких циклов с наработкой $\tau_{ПР}$ в одном цикле. Перед каждым применением проводится контрольно-технический осмотр с использованием инструментальных средств контроля работоспособности изделия. В течение всего цикла применения согласно тактико-техническим требованиям должен обеспечиваться заданный уровень безотказности изделия $P_{ПР}^{зад}$. В предположении, что интенсивность отказов изделия в течение времени наработки $\tau_{ПР}$ является постоянной $\lambda_{ПР} = \lambda_0$, из уравнения

$$P(\tau_{ПР}) = \exp(-\lambda_0 \tau_{ПР}) = P_{ПР}^{зад}$$

получаем величину максимальной наработки изделия в одном цикле по условиям безотказности и безопасности применения:

$$\tau_{ПР} = -\frac{\ln P_{ПР}^{зад}}{\lambda_0}. \quad (2)$$

Циклы применения разделены интервалами времени ожидания $t_{ОЖ}$, в течение которого проводятся работы по предварительной подготовке, контролю и текущему ремонту изделия. Время цикла применения и ожидания в совокупности составляют продолжительность эксплуатационного цикла изделия

$$t_{Ц} = \tau_{ПП} + t_{ОЖ}. \quad (3)$$

При заданном сроке службы $t_{СС}$ среднее число возможных циклов применения изделия составит:

$$n = \frac{t_{СС}}{t_{Ц}}. \quad (4)$$

Межремонтный ресурс по наработке $\tau_{МР}$ устанавливается также исходя из обеспечения требуемой безотказности и безопасности эксплуатации (2). Число необходимых ремонтов и межремонтный ресурс в календарном исчислении рассчитываются по формулам:

$$m = ent \left[\frac{\tau_{ПП}}{\tau_{МР}} \right], \quad (5)$$

$$t_{МР} = \frac{t_{СС}}{m}, \quad (6)$$

где $ent[\cdot]$ – операция выделения целой части числа.

В ходе реализации программных мероприятий происходит непрерывное изменение возраста и технического состояния парка ВВСТ. Изделия, выработавшие технический ресурс и календарный срок изымаются из парка, а на их место поступают новые изделия. Таким образом, парк ВВСТ является неоднородным по своему возрасту и техническому состоянию. Это обстоятельство затрудняет использование классических методов теории надежности для оценки и прогноза технического состояния парка ВВСТ, в основе которых лежит гипотеза однородности технического состояния парка.

В связи с этим в данной работе предлагается модель оценки, прогнозирования и управления техническим состоянием неоднородного парка ВВСТ.

Поставка и снятие с эксплуатации изделий ВВСТ осуществляется партиями определенного объема. Каждая партия представляет собой учетную единицу в системе материально-технического обеспечения войск. Возраст партии однозначно определяет мероприятия, которые должны быть проведены в ближайшей перспективе для поддержания их

технического состояния на заданном уровне. Это позволяет структурировать парк ВВСТ по возрастному признаку и определить последовательность мероприятий по его техническому обслуживанию и восстановлению.

Предлагается календарный срок, который для большинства видов ВВСТ кратен пяти годам, разбить на пятилетние периоды. Так, для большинства образцов ракетно-артиллерийского вооружения календарный срок составляет 10-15 лет, бронетанковой техники 15-20 лет, авиационной техники 20-30 лет, кораблей и судов ВМФ 30-40 лет. По каждому виду ВВСТ для любого момента времени можно построить «возрастную» диаграмму изделий в парке (рисунок 2).

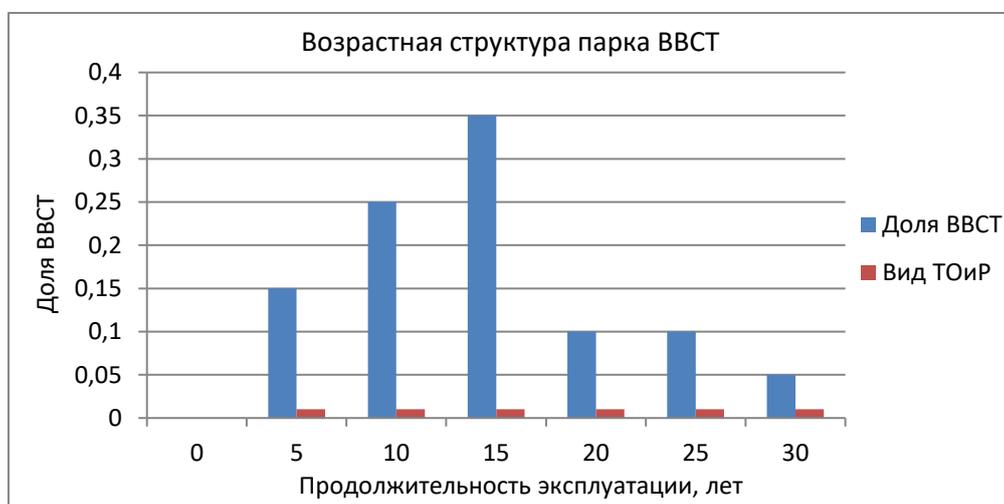


Рисунок 2 – «Возрастная» диаграмма изделий в парке ВВСТ

Диаграмма отображает для каждого возрастного периода долю образцов ВВСТ $\delta_N(t_i, t_{i+1}) = \frac{N(t_{i+1}) - N(t_i)}{N(t_{cc})}$, находящихся в возрасте (t_i, t_{i+1}) , где $N(t_{cc})$ – общее количество изделий в парке за время срока службы ВВСТ на интервале $t_{i+1} = t_i + \Delta t$; $\Delta t = 5$; $i = 1, 2, \dots, n$; $n = \frac{t_{cc}}{5}$. Нетрудно видеть, что $\sum_{i=1}^n \delta_N(t_i, t_{i+1}) = 1$.

На диаграмме для каждого возрастного периода указывается перечень видов технического обслуживания и ремонта (ТОиР), проводимых в парке ВВСТ:

КТО – контрольно-технические осмотры;

СР – средний (профилактический) ремонт;

КР – капитальный (восстановительный) ремонт.

Использование пятилетнего периода обеспечивает также привязку динамики изменения технического состояния с реализацией мероприятий ГПВ и ГОЗ.

Техническое состояние парка характеризуется:

- средним количеством $N_{И}$ исправных (работоспособных) изделий, находящихся в готовности к применению;
- средним количеством $N_{ТР}$ образцов, находящихся на текущем ремонте в войсковых частях;
- средним количеством $N_{БР}$ образцов, находящихся на восстановительном (среднем и капитальном) ремонте в сервисных центрах или на предприятиях промышленности.

Таким образом, общая численность образцов ВВТ, находящихся в войсках, равна сумме трех составляющих:

$$N(t) = N_{И}(t) + N_{ТР}(t) + N_{БР}(t), \quad (7)$$

где t – годовой срез программного периода.

Эти данные поступают в органы военного управления из войск согласно табелей срочных донесений.

Для годового среза динамику изменения состояний парка ВВСТ для каждого возраста можно описать следующим графом (рисунок 3).

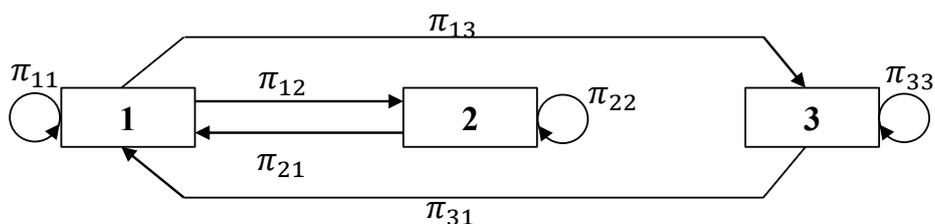


Рисунок 3 – Граф состояний образцов ВВСТ в парке

На рисунке цифрами обозначено:

- 1 – исправное состояние образца ВВТ;
- 2 – текущий ремонт образца ВВТ;
- 3 – восстановительный ремонт образца ВВТ.

Переходы из исправного состояния в состояния ремонта осуществляются с вероятностями π_{ij} , которые можно рассчитать по статистическим данным:

$$\pi_{12}(t) = \frac{N_{TP}(t)}{N_H(t)} = \frac{P_{TP}(t)}{P_H(t)}; \pi_{13}(t) = \frac{N_{BP}(t)}{N_H(t)} = \frac{P_{BP}(t)}{P_H(t)}; \pi_{11} = 1 - \pi_{12} - \pi_{13}, \quad (8)$$

где $P_{TP}(t) = \frac{N_{TP}(t)}{N(t)}$ – доля образцов ВВТ, находящихся на текущем ремонте; $P_{BP}(t) = \frac{N_{BP}(t)}{N(t)}$ – доля образцов ВВТ, находящихся на восстановительном ремонте для годового среза t .

Для учета процессов старения и износа изделий в процессе эксплуатации используем модель линейной зависимости интенсивности отказов изделия на межремонтном интервале от календарного времени эксплуатации

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 + \alpha t, & (k-1)t_{BP} < t < kt_{BP} \\ \lambda_0, & t = kt \end{cases}; k = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

где λ_0 – интенсивность внезапных отказов; α – скорость накопления постепенных отказов вследствие старения и износа изделий.

Тогда вероятность перехода изделия за время Δt из исправного состояния в неработоспособное состояние будет равна

$$\pi_{12}(\Delta t) = \exp\left(-\int_0^{\Delta t} \lambda(\tau) d\tau\right) = \exp\left(-\lambda_0 \Delta t - \frac{\alpha \Delta t^2}{2}\right). \quad (10)$$

В ходе текущего ремонта происходит восстановление изделия, при котором устраняется причина возникновения внезапного отказа, т.е. происходит обнуление величины $\lambda_0 \Delta t$. Восстановленное изделие возвращается в парк, однако вероятность его исправного состояния уже не равна единице, а составляет величину $P_1(\Delta t) = \exp\left(-\frac{\alpha \Delta t^2}{2}\right)$.

Параметр накопления постепенных отказов α может быть рассчитан по статистике наблюдений за парком изделий по формулам:

$$\alpha(t) = \frac{N_{TP}(t) - N_{TP}(t-1)}{\Delta t N_H(t-1)}; \alpha = \frac{\sum_{t=1}^{t_{MP}} \alpha(t)}{t_{MP}}, \quad (11)$$

где t_{MP} – межремонтный срок службы.

Используя формулы (8), (9), (11) и статистику наблюдений за парком ВВСТ, нетрудно рассчитать оценки интенсивностей отказов изделий λ_0, α .

Устранение старения и износных явлений осуществляется путем проведения восстановительного (капитального и среднего) ремонта. После такого ремонта изделие «обновляется» и его безотказность определяется только интенсивностью внезапных отказов.

Переходы из состояний ремонта в исправное состояние также осуществляется с вероятностями π_{ji} , которые рассчитываются с учетом среднего времени выполнения ремонтных работ τ :

$$\pi_{21}(t) = 1 - \frac{\tau_{ТР}}{\Delta t}; \pi_{22} = 1 - \pi_{21}; \pi_{31}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_{БР}}{\Delta t}, & \tau_{БР} < \Delta t \\ 1 - \frac{\tau_{БР}}{k\Delta t}, & \tau_{БР} \geq \Delta t \end{cases}; \pi_{33} = 1 - \pi_{31}, \quad (12)$$

где $k = \text{ent} \left[\frac{\tau_{БР}}{\Delta t} \right]$ – целое число годовых срезов, в пределах которых может быть выполнен восстановительный ремонт.

Текущий ремонт изделия осуществляется за достаточно короткое время ($\tau_{ТР} \ll \Delta t$), поэтому в практических задачах он часто принимается мгновенным ($\pi_{21}(t) = 1$).

В дальнейшем величину годового интервала принимаем $\Delta t = 1$, а временные параметры $\tau_{ТР}, \tau_{БР}$ исчисляем в годовом измерении.

Расчетные формулы (8), (11), (12) являются приближенными и учитывают изменения состояния парка ВВСТ в пределах учетного года по данным таблицей срочных донесений из войск.

На рисунке 4 показан график изменения технической готовности парка ВВСТ при условии, что продолжительность среднего и капитального ремонта ВВСТ не превышает учетного года.

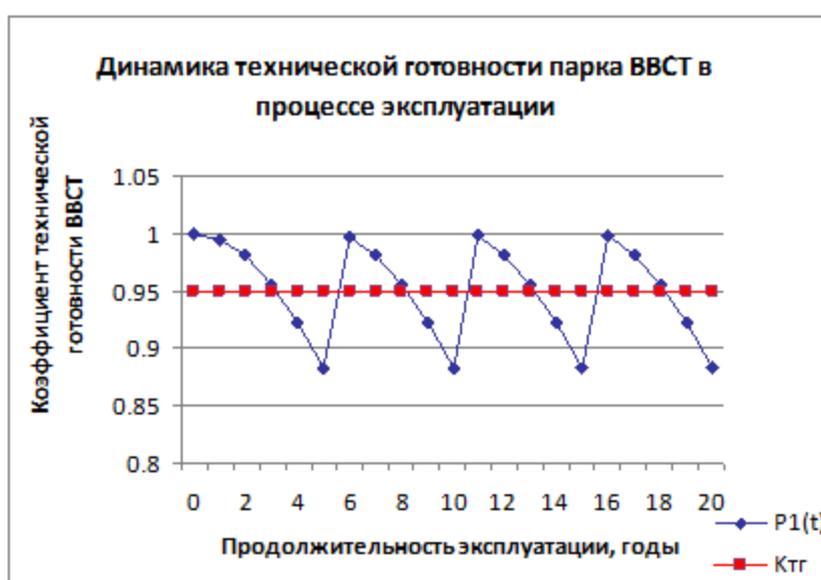


Рисунок 4 – График изменения технической готовности парка ВВСТ

По опыту практической деятельности сервисных центров и предприятий промышленности, осуществляющих восстановительный ремонт для сложных комплексов ВВТ (самолеты, ЗРК, корабли и др.), коэффициент длительности ремонта может составлять $k = 2 \dots 5$.

В общем случае динамику состояний парка ВВСТ для каждой возрастной группы можно описать марковским дискретным процессом с вероятностями состояний по годовым срезам программного периода:

$$P_1(t+1) = [1 - \pi_{12}(t)]P_1(t) + \pi_{21}(t)P_2(t) + \pi_{31}(t)P_3(t);$$

$$P_2(t+1) = [1 - \pi_{21}(t)]P_2(t) + \pi_{12}(t)P_1(t);$$

$$P_3(t+1) = [1 - \pi_{31}(t)]P_3(t) + \pi_{13}(t)P_1(t); t = 1, 2, \dots;$$

с начальными условиями: $t = 0; P_1(0) + P_2(0) + P_3(0) = 1$.

Полученные оценки являются статистическими, поэтому для них определяются доверительные интервалы

$$[P_i(t) - t_{d, N-1} \sigma_{p_i}(t), P_i(t) + t_{d, N-1} \sigma_{p_i}(t)],$$

где $t_{d, N-1}$ – квантиль распределения Стьюдента на уровне $d = 0,93$ $N - 1$ степенью свободы;

$\sigma_{p_i}(t) = \sqrt{\frac{P_i(t)[1-P_i(t)]}{N_i(t)}}$ – оценка среднего квадратического отклонения (СКО) для вероятности $P_i(t)$.

Рассмотренная модель может быть использована для прогнозирования технического состояния парка ВВТ на будущие периоды времени для любой «возрастной» группы парка ВВСТ.

Общий алгоритм оценивания и прогнозирования технического состояния включает в себя следующие блоки (рисунок 5):

- мониторинг технического состояния парка ВВСТ и формирование его «возрастной» структуры;
- статистическая оценка показателей надежности изделий ВВСТ в парке;
- статистическая оценка возможностей войсковых органов и сервисных центров по выполнению текущего и восстановительного ремонта;
- прогнозирование уровня исправности изделий ВВСТ в парке;
- обобщенная оценка коэффициента готовности парка ВВСТ.

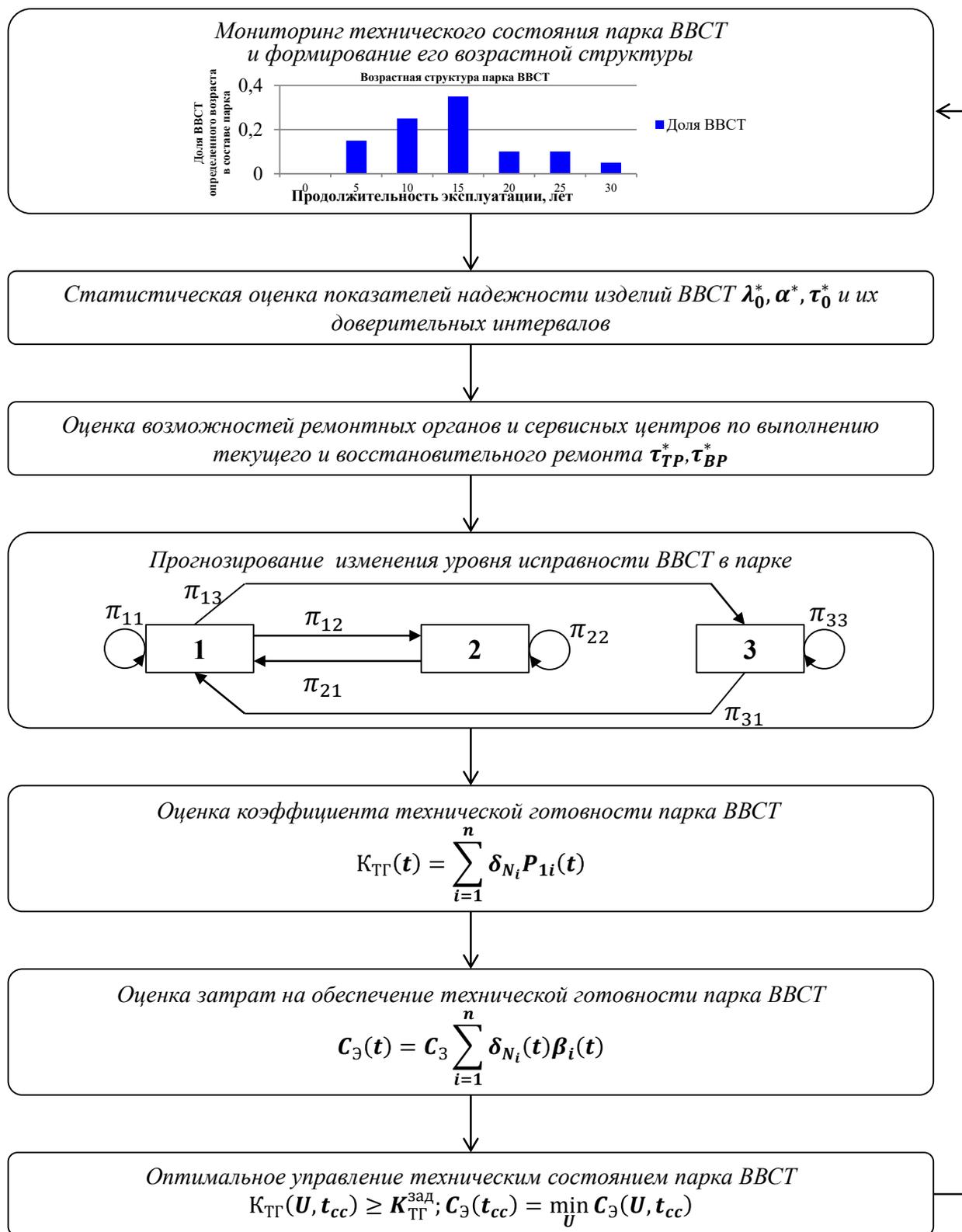


Рисунок 5 – Общий алгоритм оценивания и прогнозирования технического состояния образцов ВВСТ

Обобщенная оценка коэффициента технической готовности ВВСТ в парке рассчитывается путем усреднения вероятности исправного состояния ВВСТ различных «возрастных групп»:

$$K_{\text{ТГ}}(t) = \sum_{i=1}^n \delta_{N_i} P_{1i}(t). \quad (13)$$

Для поддержания технической готовности парка ВВСТ необходимо рациональным образом спланировать объемы и сроки проведения технического обслуживания и ремонта ВВСТ так, чтобы обеспечить минимальные затраты ресурсов. Данная задача рассматривалась во многих работах, посвященных вопросам эксплуатации различных технических систем [см., например, 3; 4; 6-8]. Отличительным признаком решаемой ниже задачи является наличие различных «возрастных» групп ВВСТ в парке, для которых сроки и объемы выполнения восстановительных работ в общем случае будут зависеть от «возраста» ВВСТ.

Кроме того, здесь возникает дополнительная альтернатива – снятие с эксплуатации самой «возрастной» группы ВВСТ, если затраты на ее эксплуатацию будут чрезмерно высоки по сравнению с «новым» типом образцов ВВСТ. Под «новым» типом образца ВВСТ понимается либо модернизированный вариант существующего типа ВВСТ с улучшенными тактико-техническими и эксплуатационными характеристиками, либо принципиально новая разработка образца ВВСТ с более высоким военно-техническим уровнем (боевым потенциалом).

Рассмотрим основные затраты, связанные с эксплуатацией ВВСТ в войсках. Эти затраты включают в себя:

- стоимость закупки «старых» и «новых» образцов ВВСТ с учетом их морального и физического износа, а также ценовой инфляции C_3 ;
- стоимость эксплуатации ВВСТ в войсках, включая затраты на их содержание, проведение контрольно-технических смотров и проверок, подготовку к применению $C_Э$;
- стоимость текущего $C_{\text{ТР}}$ и восстановительного $C_{\text{БР}}$ ремонта образцов ВВСТ.

Исходя из теории и практики технико-экономического анализа ВВСТ [8; 9], примем следующие допущения относительно методики расчетов технико-экономических параметров ВВТ:

- годовая стоимость эксплуатации и ремонта образца ВВТ пропорциональна первоначальной стоимости закупки $C_Э = k_Э C_3$; $C_P = k_P C_3$ и подвержена инфляционным изменениям;

- инфляционные изменения цен учитываются дефлятором

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

где E – нормативный уровень годовой инфляции.

Найдем для каждой «возрастной» группы ВВСТ текущую стоимость затрат на их техническое обеспечение:

для 1-й группы ($0 < t < \Delta t$)

$$C_{Э1}(t) = C_3 [1 + k_Э \sum_{j=1}^t (1 + E)^j + k_{ТР} \sum_{j=1}^t (1 - P_1(j)) (1 + E)^j] N_1;$$

для 2-й группы ($\Delta t \leq t < 2\Delta t$)

$$C_{Э2}(t) = C_3 [1 + k_Э \sum_{j=1}^t (1 + E)^j + k_{ТР} \sum_{t=1}^t (1 - P_1(j)) (1 + E)^j + k_{БР} (1 + E)^{t-\Delta t}] N_2;$$

для n -й группы ($(n - 1)\Delta t \leq t < n\Delta t$)

$$C_{Эn}(t) = C_3 [1 + k_Э \sum_{j=1}^t (1 + E)^j + k_{ТР} \sum_{t=1}^t (1 - P_1(j)) (1 + E)^j + k_{БР} (1 + E)^{t-(n-1)\Delta t}] N_n.$$

Из приведенных выражений видно, что затраты на эксплуатацию для каждой «возрастной» группы ВВСТ отличаются только численностью группы и коэффициентом удельных затрат, зависящих от возраста t

$$C_{Эi}(t) = C_3 \beta_i(t) N_i, \quad (14)$$

где $\beta_i(t) = 1 + k_Э \sum_{j=1}^t (1 + E)^j + k_{ТР} \sum_{t=1}^t (1 - P_1(j)) (1 + E)^j + k_{БР} (1 + E)^{t-(i-1)\Delta t}$ – возрастной коэффициент затрат на эксплуатацию единичного образца ВВСТ определенного типа.

Поэтому далее удобно использовать именно удельные затраты на эксплуатацию парка ВВСТ. Разделив суммарные затраты на эксплуатацию парка ВВСТ на его общую численность, получим следующее выражение для удельных эксплуатационных затрат парка ВВСТ:

$$\bar{C}_Э(t) = C_3 \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i(t) N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = C_3 \sum_{i=1}^n \beta_i(t) \delta_{N_i}(t), \quad (15)$$

где $\delta_{N_i}(t) = \frac{N_i(t)}{\sum_{i=1}^n N_i(t)}$ – доля i -й «возрастной» группы в парке ВВСТ.

Удельные затраты на эксплуатацию парка ВВСТ, приведенные к стоимости закупки единичного образца $\bar{C}_Э(t)$ и коэффициент его технической готовности $K_{ТГ}(t)$ являются представительными показателями военно-экономической эффективности системы эксплуатации ВВСТ [8].

В качестве управляющих параметров будем рассматривать сроки проведения среднего и капитального ремонта $t_{СР}, t_{КР}$ ВВСТ для обеспечения требуемого уровня технической готовности в пределах

установленного срока службы t_{CC} , а также возможность досрочного прекращения эксплуатации ВВСТ в случае превышения предельно допустимых эксплуатационных затрат. Обозначим $U = \{t_{CP}, t_{KP}, t_{CC}\}$ – множество управляющих параметров техническим состоянием парка ВВСТ.

Тогда задача управления технической готовностью парка ВВСТ состоит в поддержании технической готовности парка на заданном уровне

$$K_{ТГ}(U, t) \geq K_{ТГ}^{зад}; t \leq t_{CC}$$

при минимальных затратах материальных ресурсов

$$\bar{C}_3(U, t) = \min_U \{ \bar{C}_3(U, t_{CC}); C_3(t) \}. \tag{16}$$

Здесь в качестве предельных эксплуатационных затрат принята стоимость закупки нового типа ВВСТ в данный момент времени.

Из выражений (14), (15) видно, что с увеличением продолжительности эксплуатации ВВСТ затраты на ее обеспечение непрерывно возрастают на межремонтных интервалах и скачкообразно изменяются в моменты проведения восстановительных ремонтов (рисунок 6). При достижении уровня $\frac{C_3(t)}{C_3} = 1$ при $t \leq t_{CC} = 15$ лет, эксплуатация ВВСТ должна быть приостановлена, поскольку достигнут минимум затрат, и парк ВВТ должен заменяться новым типажом ВВСТ.



Рисунок 6 – Динамика затрат на обеспечение технической готовности парка ВВСТ (вариант 1)

При определенных технико-экономических характеристиках возможен сценарий, когда при достижении календарного срока службы $t \geq t_{cc}$ эксплуатационные затраты будут составлять величину $\frac{C_3(t)}{C_3} < 1$. В этом случае оптимальным решением будет продление срока службы до очередного восстановительного ремонта.

Рассмотрим применение рассмотренной выше модели для критериев управления технической готовностью некоторого парка ВВСТ. В теории и практике эксплуатации ВВСТ известны стратегии управления техническим состоянием парка ВВСТ по ресурсу и по фактическому состоянию [8].

Стратегия *управление по ресурсу* предполагает в пределах календарного срока службы t_{cc} установление межремонтного ресурса τ_{MP} для изделий исходя из обеспечения заданного уровня их технической готовности K_{TG} . При равномерной выработке ресурса величина межремонтного ресурса однозначно определяет сроки t_{MP} проведения восстановительного ремонта. В процессе эксплуатации в случае отказа изделия производится его текущий ремонт с полным восстановлением безотказности.

Для определенности зададимся следующими характеристиками безотказности, сохраняемости и долговечности некоторого изделия ВВСТ в типовых условиях его эксплуатации:

- интенсивность внезапных отказов $\lambda_0 = 0,025$ 1/год;
- скорость нарастания постепенных отказов $\alpha = 0,01$ 1/год²;
- календарный срок службы $t_{cc} = 20$ лет;
- требуемый уровень исправности изделий в парке $P_1 \geq 0,9$.

По этим данным в соответствии с формулой

$$P_1(t_{CP}) = \exp\left(-\frac{\alpha t^2}{2}\right) \geq 0,9$$

рассчитываем срок проведения первого среднего ремонта, который составляет $t_{CP} \approx 5$ лет.

В ходе восстановительного ремонта устраняются практически все износные явления, состояние изделия «обновляется», но сохраняются все заложенные в нем параметры безотказности и сохраняемости. Поэтому через пять лет эксплуатации необходимо выполнить очередной восстановительный ремонт. Таким образом, в течение срока службы изделия необходимо выполнить как минимум три восстановительных ремонта.

Оценим затраты, связанные проведением ремонтов изделий ВВСТ.

Примем, что коэффициент затрат на текущий ремонт составляет $k_{ТР} = \frac{C_{ТР}}{C_3} = 0,05$, на средний ремонт – $k_{СР} = \frac{C_{СР}}{C_3} = 0,25$; на капитальный ремонт – $k_{КР} = \frac{C_{КР}}{C_3} = 0,5$.

Капитальный ремонт в отличие от среднего предполагает более глубокую диагностику изделия, замену элементов выработавших ресурс, приведение изделия полностью в исправное состояние. Поэтому стоимость капитального ремонта всегда выше, чем среднего ремонта. Практика эксплуатации ВВСТ свидетельствует о том, что вначале проводится средний ремонт, а затем уже капитальный ремонт.

В результате расчета по приведенным исходным данным получаем стратегию эксплуатации изделия ВВСТ, динамика коэффициента готовности и потребных затрат на его эксплуатацию приведены на рисунках 6, 7.

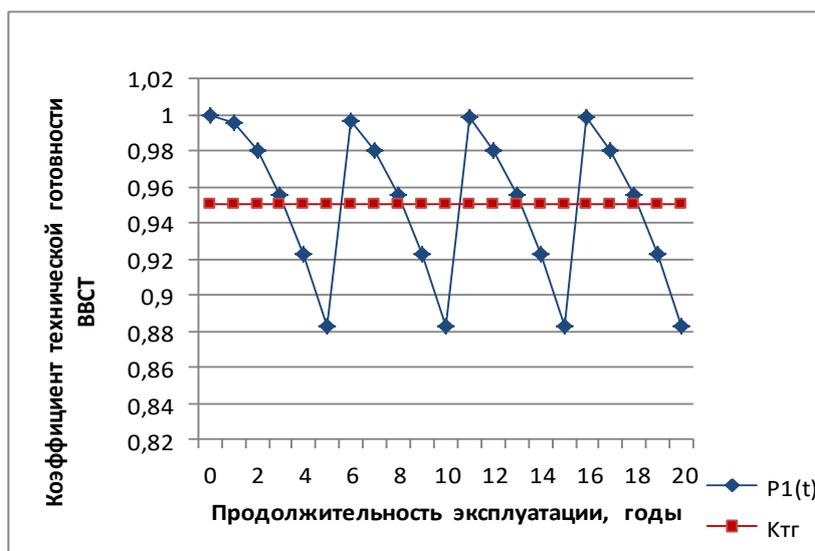


Рисунок 7 – Динамика технической готовности парка ВВСТ в процессе эксплуатации (вариант 1)

Коэффициент технической готовности однородного парка таких изделий составляет в течение срока службы $K_{ТГ}(t_{CC}) = 0,95$.

К концу срока службы $t_{CC} = 20$ лет суммарные затраты на эксплуатацию одного изделия уже превышают стоимость его закупки $\frac{C_3(t_{CC})}{C_3} \approx 1,08$. При этом в расчетах не учитывался коэффициент инфляции, увеличивающий стоимость эксплуатационных затрат. И в этом

случае возникает вопрос о целесообразности продления срока службы или завершения эксплуатации данного типа ВВСТ и заменой его новым, более совершенным типом ВВСТ.

Здесь также возникает вопрос, можно ли снизить эксплуатационные затраты в рамках стратегии управления по ресурсу за счет исключения средних ремонтов, оставив только один капитальный ремонт со сроком проведения $t_{KR} = 10$ лет? Для ответа на этот вопрос проведем соответствующие расчеты и представим полученные результаты на рисунках 8, 9.



Рисунок 8 – Динамика технической готовности парка ВВСТ в процессе эксплуатации (вариант 2)



Рисунок 9 – Динамика затрат на обеспечение технической готовности парка ВВСТ (вариант 2)

Расчеты показали, что при данной стратегии коэффициент технической готовности составляет $K_{ТГ}(t_{CC}) = 0,84$, безотказность изделий в парке на межремонтном интервале оказывается существенно ниже требуемого уровня ($P_1(t) \leq 0,9$), хотя суммарные эксплуатационные затраты составляют меньшую величину ($\frac{C_3(t_{CC})}{C_3} \approx 0,7$).

Очевидно, что этот вариант не подходит для реализации, поскольку не удовлетворяет целевым требованиям по безотказности и технической готовности ВВСТ, несмотря на меньшую стоимость его реализации.

Рассмотрим другую стратегию – *управление по техническому состоянию* парка ВВСТ. В этой стратегии периодичность ремонта изделий заранее не устанавливается. Ведется непрерывный мониторинг состояния парка ВВСТ, оценивается уровень безотказности изделий и рассчитывается средний коэффициент готовности парка ВВСТ. При достижении предельного допустимого уровня показателей безотказности или технической готовности выполняется средний ремонт изделий. Проведенные на модели расчеты показали, что для достижения уровня технической готовности парка ВВСТ $K_{ТГ}(t_{CC}) \geq 0,9$ межремонтный срок среднего ремонта должен составлять $t_{CP} \approx 7$ лет. При этом средние затраты на эксплуатацию единичного изделия ВВСТ составят ($\frac{C_3(t_{CC})}{C_3} \approx 0,61$). Именно поэтому стратегия управления по ресурсу нашла широкое применение в системах эксплуатации как зарубежных, так и отечественных ВВСТ.

Однако стратегия эксплуатации по состоянию ВВСТ обладает одним, но существенным недостатком. Она требует непрерывного наблюдения за состоянием изделий и оценку показателей их безотказности. А это предполагает создание автоматизированной информационно-управляющей системы, охватывающей всю систему военной логистики, включающей в себя как производителей, так и эксплуатантов ВВСТ [10; 11].

Таким образом, с точки зрения критерия оптимальности (16) формирование оптимального парка может быть осуществлено на основе стратегии управления по техническому состоянию при наличии соответствующей информационно-управляющей системы.

В практике эксплуатации ВВСТ однородных парков ВВСТ, как отмечалось выше, не существует. Любой парк ВВСТ содержит группы изделий, имеющих разный возраст.

Возникает вопрос, как влияет «возрастная» структура парка ВВСТ на показатели его технической готовности и эксплуатационные затраты.

Введем распределение изделий ВВСТ по «возрасту» с пятилетним периодом в долях $\delta_{t_i, t_{i+1}}$ от общей численности парка. Вариант распределения будем задавать кортежем $\delta^{(i)}(t_{cc}) = (\delta_{0,5}^{(i)}, \delta_{5,10}^{(i)}, \dots, \delta_{t_{cc}-5, t_{cc}}^{(i)})$. Каждая группа изделий с возрастом (t_i, t_{i+1}) в начальный момент времени $t = 0$ проходит полный цикл эксплуатации в течение срока службы t_{cc} по установленной программе ТО и Р. Для примера будем рассматривать программу ТОиР, реализующую стратегию эксплуатации по ресурсу, рассмотренную выше.

В таблице 1 приведены в качестве примера пять различных типов распределения ВВСТ.

Таблица 1 – Распределения ВВСТ в парке по «возрасту»

Вариант распределения	0-5	5-10	10-15	15-20	Удельные эксплуатационные затраты $\frac{C_3(t_{cc})}{t_{cc}C_3}$
$\delta^{(1)}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,054
$\delta^{(2)}$	0,5	0,25	0,15	0,1	0,060
$\delta^{(3)}$	0,1	0,15	0,25	0,5	0,060
$\delta^{(4)}$	0,1	0,4	0,4	0,1	0,054
$\delta^{(5)}$	0,1	0,25	0,45	0,2	0,071

Первый тип распределения ВВСТ по «возрасту» – равномерный по объему, второй – уменьшающийся по объему, третий – возрастающий по объему, четвертый – симметричный по объему относительно середины срока службы, пятый – произвольный.

Для каждого распределения ВВСТ проведены расчеты показателей технической готовности и удельных эксплуатационных затрат по формулам (13)...(16). Поскольку для каждого варианта распределения ВВСТ использовалась единая программа ТОиР, включающая в себя текущий ремонт, два средних и один капитальный ремонт, то коэффициент технической готовности парка ВВСТ для всех вариантов оказался

неизменным и составил $K_{ТГ} = 0,95$. Зависимость относительных годовых эксплуатационных затрат $\frac{C_э(t_{cc})}{t_{cc}C_э}$ от вариантов распределения объемов ВВСТ по «возрасту» приведена в таблице 1 и на рисунке 10.

Как следует из расчетов, влияние возрастной структуры парка ВВСТ на удельные эксплуатационные затраты незначительны. Их отклонения от равномерного распределения не превосходят 7%. Равномерное распределение объема ВВСТ с разным «возрастом» (вариант 1) с практической точки зрения является более предпочтительным, так как упрощает планирование закупок ВВСТ при формировании парка, а также планирование восстановительного ремонта в сервисных центрах и на предприятиях промышленности. Вариант 4 с симметричным по «возрасту» объемом ВВСТ относительно среднего срока службы также обеспечивает в рамках рассмотренного примера наименьший уровень эксплуатационных затрат (таблица 1). Пятый вариант распределения, выбранный случайным образом, является более затратным с экономической точки зрения.

Разработанная модель управления технической готовностью ВВСТ с оценкой уровня эксплуатационных затрат позволяет на этапе планирования и в ходе реализации ГПВ и ГОЗ определять рациональные объемы закупок ВВСТ для оснащения войск с учетом располагаемых производственных возможностей предприятий ОПК, материальных и финансовых ресурсов.

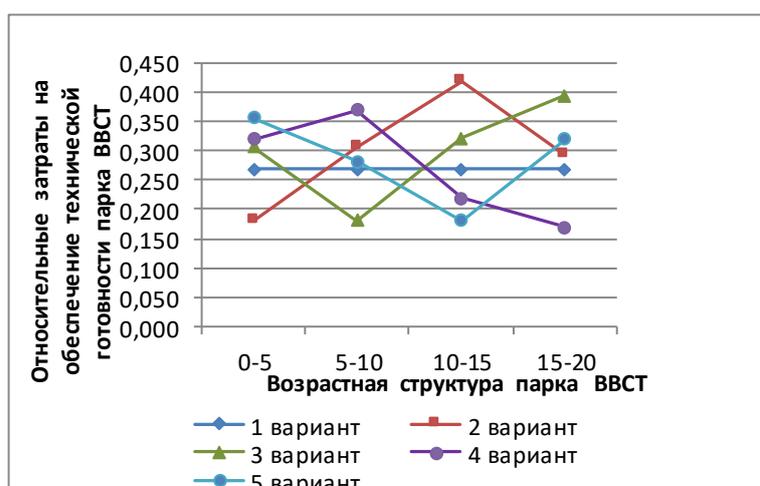


Рисунок 10 – Динамика стоимости затрат на обеспечение технической готовности парка в зависимости от возрастной структуры парка ВВСТ

Список использованных источников

1. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе. Ч.1,2 / Под ред. В.М. Буренка. М.: Издательская группа «Граница», 2013. – 520 с.
2. Буравлев А.И. Методика оценки военно-технического уровня парка ВВТ в ходе реализации программных мероприятий по их закупке и ремонту // Вооружение и экономика. 2016. №4(37).
3. Буравлев А.И. Военно-экономические и военно-технические аспекты оценки боевых возможностей группировок войск в задачах программно-целевого планирования // Вооружение и экономика. 2020. №3(53).
4. Дедков В.К., Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем. М.: Высшая школа, 1976. – 405 с.
5. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988. – 320 с.
6. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М.: Высшая школа, 1981. – 368 с.
7. Смирнов Н.М., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
8. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники. М.: Издательство «Граница», 2015. – 304 с.
9. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Оценка стоимостных показателей высокотехнологичной продукции. М.: Издательская группа «Граница», 2012. – 424 с.
10. Военная логистика: история, методология, современное состояние и перспективы развития: коллективная монография / Под ред. А.Х. Курбанова. СПб.: ООО «Копи-Р Групп», 2014. – 284 с.
11. Дубовский В.А., Курбанов А.Х., Плотников В.А. Сетевая модель планирования и управления процессами жизненного цикла вооружения и военной техники: процедура построения и реализации // Известия РАН. 2020. №3(113). – С. 39-45.