

УДК 519.873

Алгоритм и методика анализа надежности боевой машины

Карасев В. О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информатика и системы управления»*

*Научный руководитель: Суханов В.А., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информатика и системы управления»*

suhanov@iu1.bmstu.ru

Одним из основных показателей качества сложной наукоемкой продукции (в том числе военного назначения) является ее надежность. Контроль показателей надежности является одним из основных инструментов управления жизненным циклом изделия. Прежде, чем рассматривать вопрос анализа надежности боевой машины, необходимо уточнить несколько определений:

Жизненный цикл изделия (далее ЖЦ) – это совокупность этапов, через которые проходит изделие за время своего существования[1].

Управление Жизненным циклом изделия – это многоуровневое управление свойствами изделия на всех стадиях его ЖЦ. Управление жизненным циклом осуществляется в процессе разработки, производства, обеспечения эксплуатации, ремонта и утилизации изделий.

Надёжность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования[2].

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. В данной статье основное внимание будет уделено показателю безотказности.

Безотказность – Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки[2].

Целесообразно будет дать краткую характеристику объекта, рассматриваемого в данной статье. Алгоритм и методика анализа надежности рассматривается в применении к

Боевой машины ЗРПК «Панцирь С1». В открытых источниках приведены следующие данные:

Панцирь-С1 (индекс ГРАУ — 96К6, по кодификации НАТО — SA-22 *Greyhound* (англ. *борзая*)) — российский самоходный зенитный ракетно-пушечный комплекс (ЗРПК) наземного базирования. Разработан специалистами ОАО «КБП им. академика А.Г. Шипунова». Комплекс предназначен для ближнего прикрытия гражданских и военных объектов (в том числе комплексов ПВО большой дальности) от всех современных и перспективных средств воздушного нападения. Также может осуществлять защиту обороняемого объекта от наземных и надводных угроз. Комплекс предназначен для защиты малоразмерных объектов от средств воздушного нападения (как пилотируемых, так и беспилотных).

От надежности Боевой машины в составе комплекса зависит возможность комплекса выполнять свою основную боевую задачу. Существуют различные методы оценки анализа надежности, как общие, так и частные. В данной статье рассматривается экспериментальная методика анализа эксплуатационной надежности ОАО «КБП им. А.Г. Шипунова». Данная методика достаточно объемна и, в связи с этим, не представлена в тексте статьи.

Экспериментальная методика разработана специалистами ОАО «КБП» на основе существующих разрозненных методик анализа надежности изделий с целью обобщения и универсализации процесса расчета. Основным преимуществом данной методике является то, что в нее заложены практически все специфичные для эксплуатации БМ нюансы, такие как:

- Разные режимы работы БМ
- Экспертные коэффициенты, описывающие режимы работы БМ
- Резервируемость различных автоматических систем БМ в разных режимах работы.

Минусами данной методики являются:

- Достаточно высокая сложность формализации входных данных
- Присутствие различных усложнений, относительно классических схем анализа надежности, затрудняющих понимание и реализацию методики на практике.

В основе методики лежит структурно-логический анализ. Рассмотрим данный вид анализа надежности более подробно.

Большинство технических объектов являются сложными системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов, устройств контроля, управления и т.д.

Техническая система (ТС) - совокупность технических устройств (элементов), предназначенных для выполнения определенной функции или функций. Соответственно, элемент - составная часть системы. Расчленение ТС на элементы достаточно условно и зависит от постановки задачи расчета надежности.

При определении структуры ТС в первую очередь необходимо оценить влияние каждого элемента и его работоспособности на работоспособность системы в целом. С этой точки зрения целесообразно разделить все элементы на четыре группы[4]:

1. Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы
2. Элементы, работоспособность которых за время эксплуатации практически не изменяется и вероятность безотказной работы близка к единице.
3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время планового технического обслуживания
4. Элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к отказу системы.

Очевидно, при анализе надежности ТС имеет смысл включать в анализ только элементы последней группы.

Для расчетов параметров надежности удобно использовать структурно-логические схемы надежности ТС, которые графически отображают взаимосвязь элементов и их влияние на работоспособность системы в целом. Структурно - логическая схема представляет собой совокупность ранее выделенных элементов, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Критерием для определения вида соединения элементов (последовательного или параллельного) при построении схемы является влияние их отказа на работоспособность ТС.

В целом анализ структурной надежности ТС, как правило, включает следующие операции:

1. Анализируются устройства и выполняемые системой и ее составными частями функции, а также взаимосвязь составных частей.
2. Формируется содержание понятия «безотказной работы» для данной конкретной системы.
3. Определяются возможные отказы составных частей и системы, их причины и возможные последствия.
4. Оценивается влияние отказов составных частей системы на ее работоспособность.

5. Система разделяется на элементы, показатели надежности которых известны.
6. Составляется структурно - логическая схема надежности технической системы, которая является моделью ее безотказной работы.
7. Составляются расчётные зависимости для определения показателей надежности ТС с использованием данных по надежности её элементов и с учётом структурной схемы.

Рассмотрим структурно-логические схемы чуть более подробно.

Последовательное соединение, при котором отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. *Параллельным* (с точки зрения надежности) считается соединение, при котором отказ любого элемента не приводит к отказу системы, пока не откажут все соединенные элементы. Рассмотрим математический аппарат расчета надежности для отдельных последовательных и параллельных участков структурно-логической схемы. Введем следующие обозначения:

p – вероятность безотказной работы элемента

q - вероятность отказа элемента.

Системы с последовательным соединением элементов. В системе с последовательным соединением для безотказной работы в течение некоторой наработки t необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее n элементов работал безотказно в течение этой наработки. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы n элементов определяется по теореме умножения вероятностей:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)) \quad (1)$$

Аргумент (t) , показывающий зависимость показателей надежности от времени, опускаем для сокращения записей формул. Надежность системы при последовательном соединении оказывается тем более низкой, чем больше число элементов.

Если все элементы системы работают в режиме нормальной эксплуатации, можно записать закон распределения вероятности отказа системы, который по факту является экспоненциальным распределением, хорошо известным в теории надежности:

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\lambda t), \quad (2)$$

где $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const}$ – есть интенсивность отказов

системы. Таким образом, интенсивность отказов системы при последовательном соединении элементов равна сумме интенсивностей отказов элементов[3].

Системы с параллельным соединением элементов. Для отказа системы с параллельным соединением элементов при наработке изделия, равной t , необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Отказ системы заключается в совместном отказе всех элементов, вероятность чего (при допущении независимости отказов) может быть найдена по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказа элементов:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (3)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы:

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (4)$$

При экспоненциальном распределении наработки: $P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n$,

откуда средняя наработка системы $T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$,

По факту схема надежности, которая строится согласно методике, является **комбинированной**, то есть включает в себя как параллельные, так и последовательные соединения. Кроме того она является **иерархической**.

Для вычисления надежности всей комбинированной схемы необходимо вычислить надежность отдельных элементов. Для этого необходимо знать их наработку и отказы. Однако просто иметь информацию о факте отказа недостаточно, так как методика накладывает определенные ограничения на виды отказов, участвующие в анализе надежности. В частности, следующие виды отказов методикой не учитываются:

- зависимые (зависимость должна быть установлена однозначно);
- эксплуатационные;

- вызванные применением оборудования, не являющегося объектом испытаний;
- вызванные воздействием внешних факторов, не предусмотренных Конструкторской документацией (КД) и прочие;

Таким образом, при реализации методики необходимо предусмотреть возможность отбора отказов, которые поступают для расчета показателей надежности.

Так же Экспериментальная методика анализа усложняется введением специальных коэффициентов, отражающих особенности работы изделий, производимых КБП. В частности:

- Коэффициент условной вероятности полной потери работоспособности изделия
- Коэффициент загрузки составной части изделия
- Коэффициент относительной эффективности при использовании резервных составных частей
- Коэффициент относительного времени нахождения изделия в заданном режиме работы в течение суток.

Исходя из всего вышеперечисленного, исходными данными для методики являются:

- Структурно-логическая схема анализа надежности изделия
- Выработанный ресурс (реальное время работы систем в часах, получено с автоматического устройства учета ресурса) отдельных составных систем изделия
- Отказы отдельных составных систем изделия
- Специальные коэффициенты

После изучения и доработки методики был разработан алгоритм анализа эксплуатационной надежности БМ и выполнена его программная реализация на языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio 2008. После оптимизации, основной алгоритм занимает 238 строк. Размер исполняемого файла (с включенными unit-тестами) 33КБ. В основе алгоритма лежит построение рекурсивной комбинированной логической структуры надежности. С узлами данной структуры связана дополнительная информация:

- значения коэффициентов
- кол-во учитываемых отказов
- условное количество отказов для безотказных узлов
- наработка

Необходимо отметить, что для изделий, имеющих внутреннюю логическую структурную схему надежности, не заданы отказы и наработка, так как их надежность

рассчитывается на основе дочерних элементов рекурсивно. Алгоритм преобразует входные данные об отдельных узлах в структурно-логическую схему и строит по ней полином, для которого определены следующие операции:

- Сложение (вычитание) с другим полиномом
- Умножение с другим полиномом
- Умножение полинома на константу

После построения полинома производится его вычисление. Результат вычисления полинома – интенсивность отказов боевой машины. Данный расчет выполняется для всех заданных режимов работы БМ. Из полученной интенсивности отказов с помощью простейших арифметических преобразований получают средняя наработка на отказ и вероятность безотказной работы боевой машины. Таким образом, алгоритм выполняет основную задачу, получение эксплуатационных показателей надежности. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1. Диаграмма потоков данных алгоритма представлена на рисунке 2. На диаграмме изображены исходные данные алгоритма, преобразования, которые происходят в процессе работы алгоритма и полученный результат.

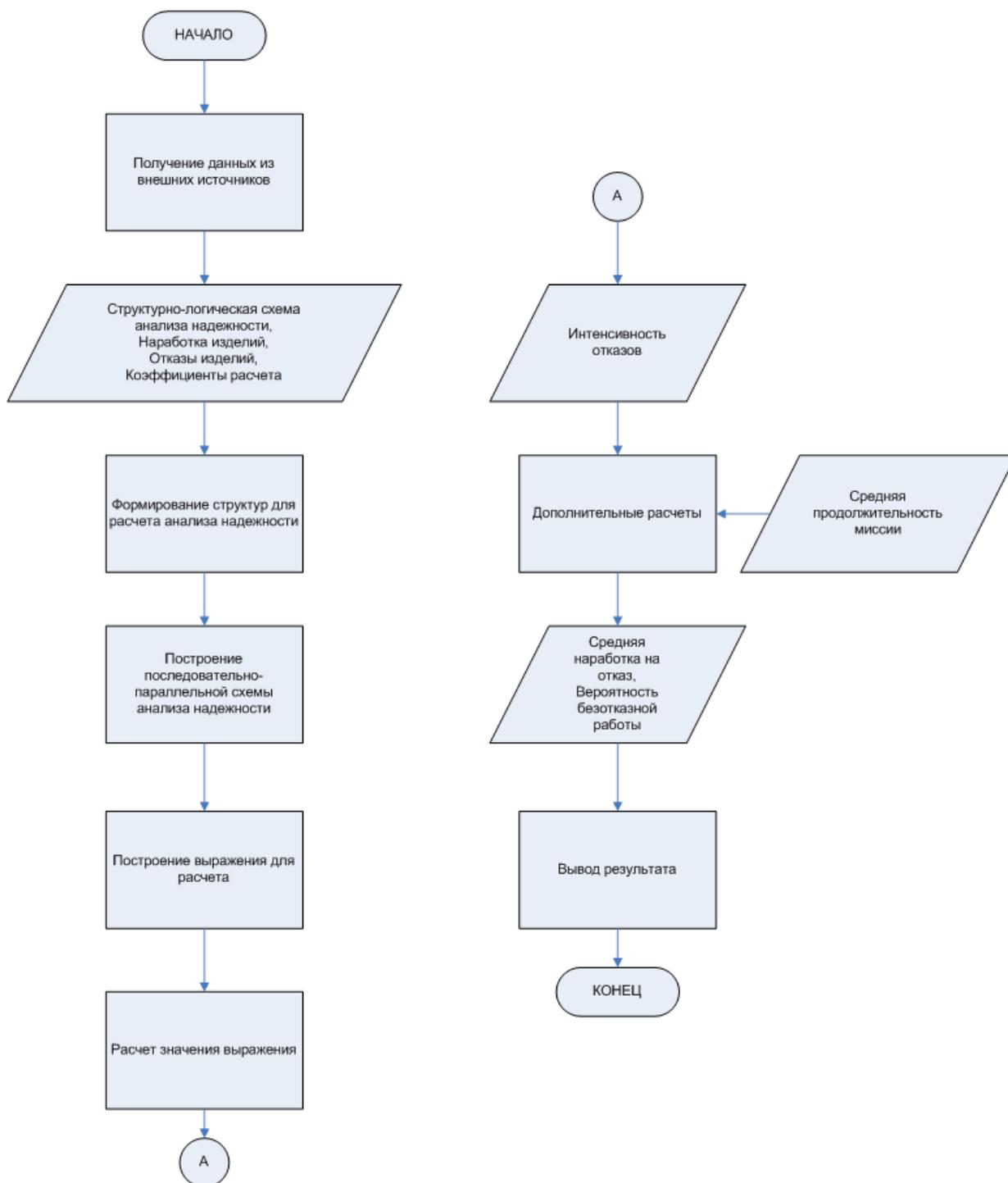


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Для того, чтобы убедиться в работоспособности алгоритма было произведено тестирование алгоритма на тестовых исходных данных. В качестве входных тестовых данных использовалась информация о наработках и отказах контролируемых в анализе надежности систем боевой машины (рисунок 3).

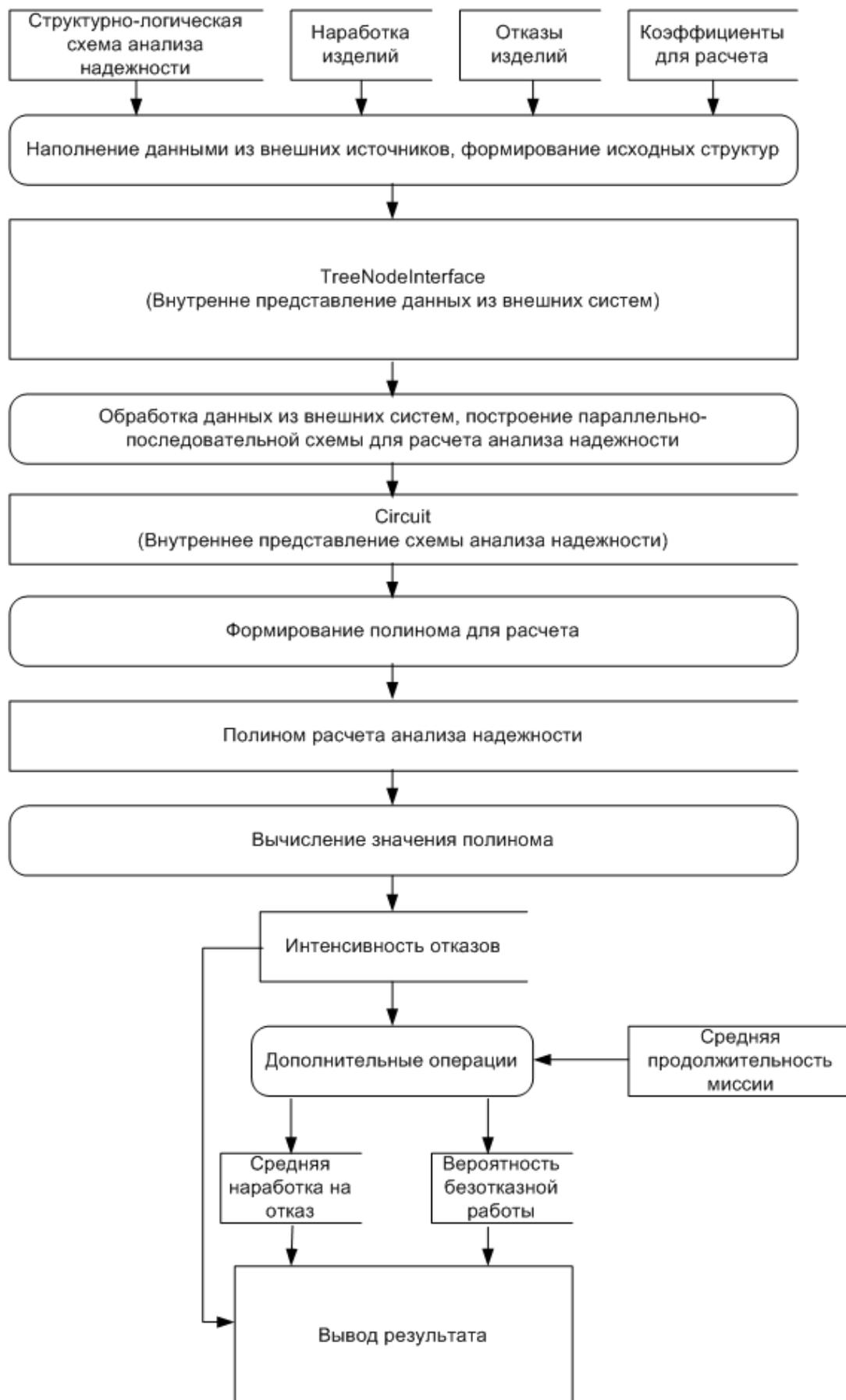


Рис. 2. Диаграмма потока данных алгоритма

| "Наработка" | "Кол-во отказов" | "Наименование с/ч" |
|-------------|------------------|--|
| 2745 | 1 | "Преобразователь статический 220 В, 400 Гц (ПС)" |
| 2745 | 1 | "Система электропитания (СЭП)" |
| 3080 | 1 | "Устройство ввода-вывода (УВВ)" |
| 3080 | 2 | "Блок управления системы автоматики (БУСА)" |
| 3080 | 0 | "Пульт оператора (ПО)" |
| 3080 | 0 | "Пульт командира (ПК)" |
| 3080 | 0 | "Распределитель питания (РП)" |
| 3080 | 0 | "Блок крышки (Блк)" |
| 3080 | 0 | "Блок автоматики (БА)" |
| 3080 | 0 | "Блок коммутации (БК)" |

Рис. 3. Тестовые данные (фрагмент)

```

bm->push_back(new СКbpTreeNode(1, 1768, 1, 1, 1, true, 1, "ЦВС" ));
СКbpTreeNode* sa = new СКbpTreeNode(0, 0, 0, 1, 1, true, 1, "СА" );
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 1, 1, 1, true, 1, "УВВ" ));
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 2, 1, 1, true, 1, "БУСА" ));
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 0, 1, 1, true, 1, "ПО" ));
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 0, 1, 1, true, 1, "ПК" ));
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 0, 1, 1, true, 1, "РП" ));
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 0, 1, 1, true, 1, "БА" ));
sa->push_back(new СКbpTreeNode(1, 3080, 0, 1, 1, true, 4, "БК" ));
bm->push_back(sa);
bm->push_back(new СКbpTreeNode(1, 763, 0, 1, 0.25, false, 1, "ПВВН" ));
bm->push_back(new СКbpTreeNode(1, 780, 0, 1, 0.25, false, 1, "ПВГН" ));

```

Рис. 4. Тестовые данные. Построение дерева в программе

В первом столбце указана наработка систем, во втором – количество отказов, в третьем – наименование системы. Данные по наработке получается из бортовых комплексов регистрации и сбора статистики БМ, информация об отказах формируется на основе рекламационных актов и актов отказов, сформированных специалистами гарантийных бригад и обработанных в отделе надежности ОАО «КБП».

Для запуска тестов, исходные данные с дополнительной информацией о вхождении элементов и их параллельно-последовательном соединении были введены в код программы (рисунок 4). На первом этапе такой подход позволил не реализовывать графический интерфейс для проверки алгоритма и лучше контролировать (при необходимости изменять) входные данные на этапе отладки алгоритма.

Результаты тестирования представлены на рисунке 5. В отчетах тестирования отображены частные результаты вычислений элементов полинома, и конечный результат – значения показателей надежности боевой машины. Результат сравнивается с контрольным значением, вычисленным вручную.

```
Администратор: C:\Windows\System32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7600]
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corp.), 2009. Все права защищены.

D:\_SMH\KBP_MTBF_TEST\Release>KBP_MTBF_TEST.exe
sum_t_conditional = 0.0180857
<<2745/1/1/1/1>, <2958/0.0129539/1/0.5/1>, <1261/0.0303867/1/0.3/1>, <984/0.0389407
/0.5/1/1>, <2110/2/0.5/1/1>, <3080/0.0124408/1/1/2>, <3080/0.0124408/1/1/1>, <763/0.
0502197/1/1/1>, <3080/1/1/1/1>, <2745/1/1/1/1>, f1: <1270/7/1/1/1>, 0.5: <<2745/0.0139
591/1/1/1>, <1025/0.0373831/1/1/1>, <1025/0.0373831/1/1/1>, <<1524/0.0251428/1/1/1>
>, <<<1524/0.0251428/1/1/1>, <1524/0.0251428/1/1/1>>>, <1524/0.0251428/1/1/1>>1, <12
70/0.0301714/0.5/1/1>, <1041/2/1/1/1>, <1768/1/1/1/1>, <<3080/1/1/1/1>, <3080/2/1/1
/1>, <3080/0.0124408/1/1/1>, <3080/0.0124408/1/1/1>, <3080/0.0124408/1/1/1>, <3080/0.
0124408/1/1/1>, <3080/0.0124408/1/1/4>>>
+1*exp(-0.0106512*t)+0.5*exp(-0.00528343*t)-0.5*exp(-0.0107952*t)
bm_T = 142.205
```

Рис. 5. Результат тестирования алгоритма для одного режима работы БМ (консоль)

После того, как результаты работы алгоритма совпали с вычисленными вручную, его работа была признана удовлетворительной.

Таким образом, был разработан и реализован алгоритм расчета анализа надежности в соответствии с экспериментальной методикой ОАО «КБП». Полученный программный модуль был интегрирован в Информационную систему управления жизненным циклом изделия и в данный момент проходит практическую апробацию в ОАО «КПБ им. Академика А.Г Шипунова».

Список литературы

1. ГОСТ Р 53394-2009 Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения. Введ. 2009-14-09. М.: Стандартинформ, 2010. 23 с.
2. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1990-07-01. М.: Из-во стандартов, 2002. 32 с.
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин: учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов под ред. Д.Н. Решетова. М.: Высшая школа, 1988. 238 с.
4. Судов Е.В., Левин А.И., Петров А.Н., Бороздин Д.Н. Анализ логистической поддержки. Теория и практика. М: ООО Издательство «ИнформБюро», 2014. 258 с.