

## ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.П. Маньшин

manshin@mail.ru

Е.Ю. Маньшина

elemans@mail.ru

Донской государственный технический университет,  
г. Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены вопросы нормирования показателей надежности на ранних стадиях проектирования машин, позволяющие проектировщику разрабатывать перечень критичных в плане надежности деталей и обеспечивать заданный уровень их надежности. Путем анализа существующих методов нормирования надежности выявлены их недостаточность для реализации целей проектирования и противоречия, связанные с использованием для этого экспоненциального закона надежности. Синтезирован альтернативный подход к нормированию, позволяющий выполнить полный структурный анализ проекта от показателей надежности системы в целом до деталей, безотказность которых определяет надежность машин. На структурном уровне деталей и других элементов, отказы которых не внезапны, устранено использование экспоненциального закона, но сохранена свойственная ему простота математических операций

### Ключевые слова

*Надежность, вероятность, безотказность, наработка, машина, техническая система, элемент*

Поступила 09.10.2018

© Автор(ы), 2019

---

Принятые на стадии согласования технического задания (ТЗ) параметры надежности проекта, как правило, характеризуют разрабатываемую техническую систему (ТС) в целом — долговечность как календарный срок службы  $T_k$ , вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(t)$  и наработка  $t = T$  часов (гарантированная продолжительность безотказной работы). Эти показатели, обеспеченные при разработке конструкторской документации на всех стадиях проекта (ГОСТ 15.001; 2.1208; 2.103; 2.118; 2.119), должны стать свойствами надежности при использовании ТС. При большом разнообразии машин, их механизмов и деталей, а также режимов эксплуатации безотказность является наиболее важным свойством надежности.

Наработка ТС является аргументом функции надежности  $P(t)$ . При всех видах законов надежности  $P(t)$  убывает с ростом  $t$ . В силу этого для достижения требуемой ВБР наработка должна быть рационально минимизирована и выбрана в соответствии с логикой работы ТС [1]. Детали и невосстанавливаемые изделия, вырабатывая свой ресурс, определяют наработку системы на отказ. В идеале наработки этих элементов на отказ должны совпадать или хотя бы быть кратными выбранной наработке ТС. При этом календарный срок службы  $T_k$  и требуемая наработка  $T$  связываются соотношением

$$T = T_k \cdot 365K_{\text{год}} \cdot 24K_{\text{сут}} \cdot \text{ПВ}, \quad (1)$$

где  $T_k$  — календарный срок службы в годах;  $K_{\text{год}}$  — коэффициент возможного использования ТС в год;  $K_{\text{сут}}$  — коэффициент использования ТС в сутки; ПВ — относительная продолжительность включения, которая представляет собой усредненное отношение времени включения (время разгона и время установившегося движения) к времени рабочего цикла ТС.

Высокая безотказность возможна при снижении требуемой наработки. Если эту наработку необходимо существенно увеличить, то безотказность придется поддерживать учащением технических осмотров разного объема, проектировать ключевые элементы по условию безотказности с повышением затрат на организацию системы обеспечения качества изделий [2, 3].

Вероятность безотказной работы проекта может быть выбрана из существующих отраслевых нормативов, из конкурентных условий и других соображений, в том числе из условных классов надежности, принятых для изделий машиностроения, в которых номера классов от 0 до 5 соответствуют допустимым значениям ВБР  $P(t)$  от величин менее 0,9 до 1. Обобщая представления о классах надежности в [1, 4–6], области применения классов можно рассматривать в нескольких группах характеристик ТС.

*По структурному типу изделий* (технологические комплексы, машины, агрегаты, механизмы, в которые вложены уровни сборочных единиц и деталей): при последовательном взаимодействии элементов в большинстве машин ВБР растет при углублении в структуру ТС, тогда ВБР деталей при структурном анализе может приближаться к 3–5 классам.

*По видам ТС:* ВБР планируется больше по мере роста уровня ответственности производителя перед потребителем ТС, включая в высших классах ВБР подъемно-транспортные механизмы, летательные аппараты, машины химических производств, медоборудование, военную технику и др.

По виду последствий отказов: ВБР планируется больше по мере роста ущерба от отказов машин (экономического, репутационного, катастрофического).

Принято [1–8] представлять ВБР внезапных отказов ТС экспоненциальным законом

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов в период нормального функционирования после приработки связывается со средней наработкой на отказ  $\hat{T}$  систем

$$\lambda = 1/\hat{T} \quad (3)$$

и с параметрами безотказности

$$\lambda = (-\ln P(T))/T, \quad (4)$$

откуда может быть рассчитана средняя наработка на отказ ТС

$$\hat{T} = (-T / \ln P(T)). \quad (5)$$

Этот алгоритм формирования параметров надежности ТС имеет как сторонников, так и критиков [4, 5, 9]. Как при расчетах по заданным наработке  $T$  и ВБР  $P(T)$ , так и при использовании средней наработки на отказ  $\hat{T}$ , рассчитанной по результатам испытаний  $\hat{T}$  для определения интенсивности отказов (4) и соответствующей ВБР ТС (3), остаются вопросы — все ли отказы происходят внезапно? И насколько верны параметры надежности ТС (3)–(5), вытекающие из экспоненциального закона?

Структурный анализ надежности ТС в научных источниках и учебной литературе по надежности общепринято представлять как восходящий схемный анализ от ВБР элементов к ВБР систем последовательных, параллельных и комбинированных структурных схем (рис. 1).

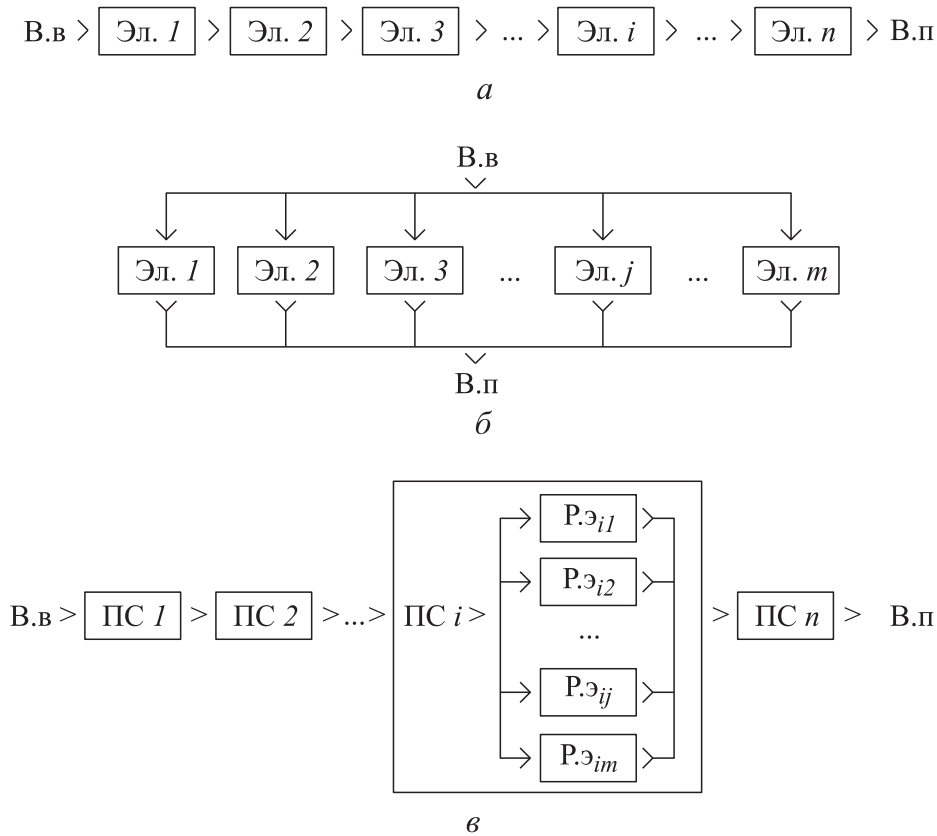
При последовательном взаимодействии элементов ТС (рис. 1, а), отказы которых независимы, экспоненциальный закон (2) представляет собой удобную математическую модель. Если ВБР системы  $P(t)$  и элементов — подсистем  $P_i(t)$  — находятся в соотношении

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (6)$$

то интенсивности отказов системы  $\lambda$  и подсистем  $\lambda_i$  находятся в соотношении

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (7)$$

которые ранжируются в зависимости от принятого принципа распределения интенсивностей по элементам.



**Рис. 1.** Структурные схемы надежности ТС, имеющих взаимодействие элементов (Эл.):

*a* — последовательное между элементами 1, 2, ..., *i*, ..., *n*; *б* — параллельное между элементами 1, 2, ..., *j*, ..., *m*; *в* — вариант комбинированного взаимодействия между подсистемами (ПС) или блоками 1, 2, ..., *i*, ..., *n*; Р.э<sub>*ij*</sub> — резервированные элементы блока ПС<sub>*i*</sub>; В.в — входные воздействия; В.п — выходные параметры ТС

Иерархическая структурная схема, сформированная из вложенных уровней подсистем и элементов [1, 5–7], позволяет выборочно или по всей структуре выполнять нисходящий анализ [1] (от ВБР ТС к ВБР элементов) наиболее важных или всех элементов. Требуемые значения ВБР элементов вместе с требуемой наработкой являются исходными данными для проектирования деталей с заданным уровнем надежности [10–12].

Алгоритм нисходящего анализа на базе (2) одинаково успешно позволяет распределять интенсивности отказов и ВБР элементов по всем вложенным уровням структурных схем, что справедливо для радиоэлектронных систем [5, 6]. Но на уровне деталей механической системы [1] этот алгоритм упирается в противоречие: если развитие постепенного отказа протекает по другому закону, то применение экспоненциального закона неверно. Отказ системы произойдет в результате последовательного взаимодействия без связи с экспоненциальным законом. Отсюда

следует ошибочность использования экспоненциального закона на структурном уровне элементов — деталей. В то же время разработка структурной схемы надежности ТС имеет смысл, когда она служит основанием для проектирования деталей и подбора стандартизованных элементов с требуемой ВБР на выбранную наработку.

Анализ ВБР ТС при параллельном взаимодействии элементов (рис. 1, б) исходит из условий: элементы включены постоянно, их отказы независимы, каждый из  $m$  элементов имеет ВБР  $P_j(t)$  и способен принять входное воздействие и преобразовать его в выходной параметр ТС. В этом случае отказ ТС произойдет после отказа последнего работоспособного элемента. Вероятность отказа системы через вероятности отказов ее элементов можно записать как

$$F(t) = \prod_{j=1}^m F_j(t); \quad (8)$$

из свойства полной группы событий

$$P(t) + F(t) = 1 \quad (9)$$

ВБР системы через ВБР элементов можно представить в виде

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)]. \quad (10)$$

Для однородных элементов

$$P(t) = 1 - [1 - P_j(t)]^m. \quad (11)$$

Простой расчет интенсивности отказов элементов или числа элементов  $m$  для обеспечения заданной ВБР ТС возможен при использовании выражения экспоненциального закона (2) только в соотношении (11) для однородных резервированных элементов. Для более сложных соотношений (10) и комбинированных структур (рис. 1, в) примеры использования экспоненциального закона не приведены.

Сложные структуры с разнонаправленным взаимодействием элементов, имеющих зависимые отказы, не дают простых возможностей разделения на элементы. Параметры функционирования и надежности должны определяться для системы в целом, что может повлечь большой объем аналитических и экспериментальных работ. Графические образы таких схем [4, 5] сопровождаются упоминанием о сложности модели функционирования и громоздкости расчетов надежности (например, сложное замкнутое взаимозависимое функционирование блоков ДВС или реактивного двигателя).

Для конструктивной реализации ТС с любым видом взаимодействия должны быть изготовлены детали, которые собираются в сборочные единицы и далее в функциональные модули (механизмы, агрегаты, блоки питания, блоки управления и др.). Современный модульный принцип построения машин предусматривает модульные операции: разработку, сборку и отладку, модификацию и модернизацию, ремонт, замену и др. Иерархическая конструктивная система, состоящая из вложенных блоков, имеет на нижнем уровне детали и прочие элементы. Если использовать эту схему в качестве структурной схемы надежности, необходим критерий распределения ВБР по элементам системы. Численное значение  $P(T)$  функции  $P(t)$  при подстановке заданной наработки  $T$  можно использовать в качестве критерия при распределении численных значений ВБР по элементам стоимости восстановления структурных единиц в случае их отказов. В стоимость восстановления могут быть включены стоимости используемых для ремонта материалов, изделий, диагностики и ремонтных работ. Могут быть включены оцененные в денежных единицах последствия отказа, такие как восстановление других отказавших элементов при зависимых отказах, потери от простоя ТС, страховые выплаты на возмещение различного рода ущерба и др.

**Целью настоящей работы** является разработка метода нисходящего анализа структурных схем надежности, устраняющего приведенные противоречия. Структурная схема надежности ТС должна быть инструментом распределения ВБР элементов по заданной ВБР ТС на начальных стадиях проекта. Тогда выбранная наработка и сбалансированная ВБР элементов будут исходными данными для проектирования с заданным уровнем надежности. Для этого структурная схема должна удовлетворять ряду условий.

Для упрощения сложных функциональных связей между элементами структурная схема надежности должна исходить из структуры конструкции.

Структурная схема должна содержать математическую модель надежности, доступную для расчетов на ранних стадиях проекта.

Модель надежности по структурной схеме должна опираться не на экспоненциальный закон, а только на фундаментальные свойства надежности технических объектов и систем (6), (8)–(11).

Критерием ранжирования ВБР элементов надо выбирать стоимость восстановления элемента в случае его отказа. Стоимость восстановления при необходимости может быть рассмотрена как сумма возмещения ущерба вследствие отказа, выраженная в денежном эквиваленте.

Нисходящий структурный анализ должен применяться одинаково эффективно как для последовательно взаимодействующих, так и для резервированных и комбинированных схем надежности.

**Альтернативное представление численного значения ВБР объекта.**

Пока время  $t$  имеет значение аргумента функции безотказности  $P(t)$ , она представляет собой функцию, убывающую по любому из известных законов или полученную статистическим путем. После выбора требуемой наработки  $t = T$  ВБР получает значение  $P(t) = P(T)$  в границах  $0 < P(T) < 1$ . Такое число может быть представлено множеством способов, из которых выбирается степенное выражение

$$P(T) = B^X, \quad (12)$$

где  $X$  определяется из логарифмического уравнения  $\log(P(T)) = X \log B$ :

$$X = \frac{\log(P(T))}{\log B}. \quad (13)$$

Независимость величины  $P(T)$  от используемого основания позволяет применять для определения степени  $X$  представления (13) как десятичный логарифм с основанием  $B = 10$ , так и натуральный логарифм с основанием  $B = e$  либо логарифм с любым основанием. Приняв значение основания степени  $B = 10$ , получаем выражение численного значения ВБР

$$P(T) = 10^X, \quad (14)$$

где  $X$  (13) определяется из логарифмического уравнения  $\lg(P(T)) = X \lg 10$ :

$$X = \lg P(T). \quad (15)$$

Показатель степени  $X$  назовем оператором ранжирования (ОР) ВБР ТС. В приложении к элементам системы показатели степени  $X_i$  также именуется ОР ВБР элементов.

Далее в этом представлении рассматривается «самый простой и самый важный случай» [8] надежности систем.

**Альтернативное представление численного значения ВБР элементов ТС при их последовательном взаимодействии.** Если структурная схема надежности ТС имеет последовательное взаимодействие элементов (см. рис. 1, а), отказы которых независимы, ее основное свойство (отказ системы при отказе любого из  $n$  элементов) в момент времени  $t = T$  можно записать как известное выражение через ВБР ее элементов из (6):

$$P(T) = \prod_{i=1}^n P_i(T).$$

В условии (6) произведение может быть получено множеством комбинаций  $P_i(T)$  и видов их представления. Применяв для ВБР системы и ее элементов представление (14), можно произведение  $P(T) = P_1(T) P_2(T) \cdots P_n(T)$  представить как  $10^X = 10^{X_1} \cdot 10^{X_2} \cdots 10^{X_n}$ , откуда связь ОР для системы и элементов

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_n. \quad (16)$$

Граничные условия для множества возможных комбинаций  $X_i$  в (16) могут быть получены из стоимостей восстановления отказавших элементов  $C_i$  при условии: элементы с большей стоимостью восстановления должны иметь большие ВБР  $P_i(T)$ , т. е. при стоимостях восстановления элементов  $C_1, C_2, \dots, C_n$  ряду ОР элементов  $X_1, X_2, \dots, X_n$  должен быть сопоставлен ряд обратных величин стоимостей —  $1/C_1, 1/C_2, \dots, 1/C_n$ , а условия ранжирования могут быть записаны суммами:

$$\frac{X_1}{X} + \frac{X_2}{X} + \dots + \frac{X_n}{X} \text{ и } \frac{\frac{1}{C_1}}{\sum \frac{1}{C_i}} + \frac{\frac{1}{C_2}}{\sum \frac{1}{C_i}} + \dots + \frac{\frac{1}{C_n}}{\sum \frac{1}{C_i}},$$

в которых граничные условия для ОР  $X_i$  получаются из равенства слагаемых:

$$\frac{X_i}{X} = \frac{\frac{1}{C_i}}{\sum \frac{1}{C_i}}.$$

Правую часть этого равенства назовем «весовой коэффициент стоимости восстановления последовательно взаимодействующих элементов» —

$$a_i = \frac{\frac{1}{C_i}}{\sum \frac{1}{C_i}}, \quad (17)$$

а значения ОР  $X_i$  — отвечающие сформулированному условию ранжирования, запишем как

$$X_i = X a_i. \quad (18)$$

Единица измерения стоимости восстановления не имеет значения, поскольку в (17) используются отношения стоимостей. Нисходящий ана-



лиз ВБР элементов ТС с последовательным взаимодействием рассмотрены далее в примере 1 системы, содержащей для простоты восприятия три элемента, хотя для действия алгоритма, основанного на (14)–(18), число элементов может быть любое.

**Пример 1.** Расчет вероятностей безотказной работы элементов ТС с последовательным взаимодействием (см. рис. 1, а) по исходным данным: ВБР системы  $P(T) = 0,9$ ; число элементов  $n = 3$ ; стоимости восстановления элементов  $C_1 = 5000$ ,  $C_2 = 3000$ ,  $C_3 = 2000$  у.е. Для ВБР элементов 1–3 рассчитаны:

ОР для ВБР ТС (15):  $X = \lg P(T) = \lg 0,9 = -0,04576$ ;

весовые коэффициенты  $a_i$  из (17) соответственно 0,193548; 0,322581; 0,483871 при сумме, равной единице;

ОР ВБР элементов  $X_i$  из (18) соответственно  $-0,00886$ ;  $-0,01476$ ;  $-0,02214$  при сумме, равной ОР системы;

ВБР элементов  $P_i(T)$  из (14) соответственно 0,979814; 0,966584; 0,950297, произведение которых равно ВБР ТС.

**Альтернативное представление численного значения ВБР элементов ТС при их параллельном взаимодействии.** В момент времени  $t = T$ , соответствующий выбранной наработке, основное свойство параллельно взаимодействующих элементов (см. рис. 1, б) (отказ системы при отказе всех элементов) можно записать как известное выражение через вероятности отказов ее элементов  $F_j(T)$  (8):  $F(T) = \prod_{j=1}^m F_j(T)$ . Принимая по аналогии

с (14)

$$F(T) = 10^Y, \quad (19)$$

где  $Y$  определяется из логарифмического уравнения  $\lg F(T) = Y \lg 10$ , получаем

$$Y = \lg F(T). \quad (20)$$

Показатель степени  $Y$  назовем ОР для вероятности отказа ТС. В приложении к элементам системы показатели степени  $Y_i$  именуется как ОР для вероятности отказа элементов. Условия (8), (19) могут быть представлены произведением:  $10^Y = 10^{Y_1} \cdot 10^{Y_2} \dots 10^{Y_m}$ , откуда

$$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_m. \quad (21)$$

Граничные условия для множества возможных комбинаций  $Y_j$  в (21) могут быть получены из стоимостей восстановления отказавших элементов

$C_j$  при условии: элементы с большей стоимостью восстановления должны иметь и соответственно меньшие вероятности отказа (что также означает большие ВБР). Таким образом, при стоимостях восстановления элементов  $C_1, C_2, \dots, C_m$  ряду показателей степени  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  должен быть сопоставлен ряд стоимостей  $C_1, C_2, \dots, C_n$  и может быть записан суммами:

$$\frac{Y_1}{Y} + \frac{Y_2}{Y} + \dots + \frac{Y_n}{Y}, \text{ и } \frac{C_1}{\sum C_j} + \frac{C_2}{\sum C_j} + \dots + \frac{C_m}{\sum C_j},$$

в которых граничные условия для ОР при  $Y_j$  получаются из равенства слагаемых  $\frac{Y_j}{Y} = \frac{C_j}{\sum C_j}$ . Правую часть этого равенства назовем «весовой коэффициент стоимости восстановления при параллельном взаимодействии элементов»

$$b_j = \frac{C_j}{\sum C_j}, \quad (22)$$

а значения ОР  $Y_j$  — отвечающие сформулированному условию ранжирования, запишем как

$$Y_j = Y b_j. \quad (23)$$

Нисходящий анализ вероятностей отказов и ВБР элементов ТС с параллельным взаимодействием рассмотрены далее в примере 2 для системы, содержащей три элемента.

**Пример 2.** Расчет вероятностей отказа и ВБР элементов ТС с параллельным взаимодействием (см. рис. 1, б) по исходным данным: ВБР системы  $P(T) = 0,9$ ; число элементов  $m = 3$ ; стоимости восстановления элементов составляют  $C_1 = 5000, C_2 = 3000, C_3 = 2000$  у.е. Для ВБР элементов 1–3 рассчитаны:

вероятность отказа системы из (9)  $F(T) = 1 - P(T) = 1 - 0,9 = 0,1$ ;

значения ОР для вероятности отказа ТС (20)  $Y = \lg F(T) = \lg 0,1 = -1$ ;

весовые коэффициенты  $b_j$  из (22) соответственно 0,5; 0,3; 0,2 при сумме, равной единице;

ОР для вероятностей отказов элементов  $Y_j$  из (23) соответственно  $-0,5; -0,3; -0,2$  при сумме, равной ОР системы;

вероятность отказов элементов  $F_j(T) = 10^{Y_j}$  соответственно 0,316228; 0,501187; 0,630957, произведение которых равно вероятности отказа ТС;

вероятности безотказной работы элементов  $P_j(T) = 1 - F_j(T)$  соответственно 0,683772; 0,498813; 0,369043, которые при проверочной подстановке в (11) дают  $P_j(T) = 1 - [(1 - 0,683772) (1 - 0,498813) (1 - 0,369043)] = 0,9$ , т. е. ВБР ТС.

**Пример 3.** Расчет вероятностей безотказной работы элементов комбинированной ТС (рис. 1, в) по исходным данным: число последовательно взаимодействующих подсистем  $n = 3$ ; число параллельно взаимодействующих элементов ПС3  $m = 4$ ; ВБР системы  $P(T) = 0,95$ ; стоимости восстановления ПС составляют  $C_1 = 5000$ ,  $C_2 = 8000$ ,  $C_3 = 12\ 000$  у.е.; стоимости восстановления параллельно взаимодействующих элементов составляют  $C_{3,1} = 3000$ ,  $C_{3,2} = 4000$ ,  $C_{3,3} = 5000$ ,  $C_{3,4} = 6000$  у.е.

Расчеты параметров надежности системы:

ОР ВБР ТС (15):  $X = \lg P(T) = \lg 0,95 = -0,022276$ ;

весовые коэффициенты  $a_i$  из (17) соответственно 0,489796; 0,306122; 0,204082 при сумме, равной единице;

ОР ВБР элементов  $X_i$  из (18) соответственно  $-0,010911$ ;  $-0,006819$ ;  $-0,004546$  при сумме, равной ОР системы;

ВБР элементов  $P_i(T)$  из (14) соответственно 0,975190; 0,984421; 0,989587, произведение которых равно ВБР ТС;

по ВБР ПС3  $P_3(T) = 0,989587$ ;

вероятность отказа ПС3 (8)  $F_3(T) = 1 - P_3(T) = 1 - 0,989587 = 0,010413$ ;

ОР для вероятности отказа ПС3 (22):  $Y = \lg F_3(T) = \lg 0,010413 = -1,982407$ ;

весовые коэффициенты  $b_{3j}$  из (22) соответственно 0,166667; 0,222222; 0,277778; 0,333333 при сумме, равной единице;

ОР для вероятностей отказов элементов  $Y_{3j}$  из (23) соответственно  $-0,330401$ ;  $-0,440535$ ;  $-0,550669$ ;  $-0,660802$  при сумме, равной ОР ПС3;

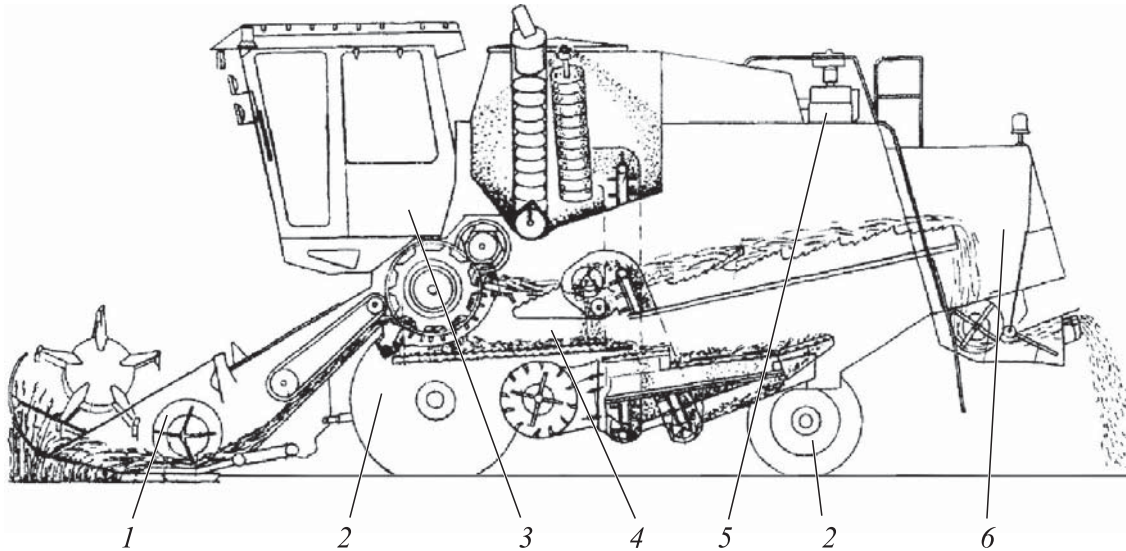
вероятности отказов элементов  $F_{3j}(T) = 10^{Y_{3j}}$  соответственно 0,467303; 0,362631; 0,281405; 0,218372, произведение которых равно вероятности отказа ПС3  $F_3(T)$ ;

вероятности безотказной работы элементов  $P_{3j}(T) = 1 - F_{3j}(T)$  соответственно 0,532697; 0,637369; 0,718595; 0,781628, которые при проверочной подстановке в (11) дают

$$P_3(T) = 1 - [(1 - 0,532697) (1 - 0,637369) (1 - 0,718595) (1 - 0,781628)] = 0,989587,$$

т. е. ВБР ПС3.

**Пример 4.** Приведем нисходящий анализ структурной схемы зерноуборочного комбайна, технологическая схема которого приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Технологическая схема зерноуборочного комбайна мод. К3С5

Конструкция комбайна разделена на агрегаты в соответствии с выполняемыми функциями: жатвенная часть 1, ходовая часть 2, органы управления 3, молотильная группа 4, моторная установка 5, измельчитель 6.

Иерархическая структурная схема имеет на первом уровне подсистемы ПС1–ПС6 (рис. 3), соответствующие агрегатам 1–6 (см. рис. 2). Каждая ПС имеет вложенные структуры 2, 3-го и далее уровней. На рис. 3 агрегат ПС4 «Молотильная группа» через вложенные ПС нижележащих уровней ПС4.2 «Очистка», ПС4.2.2 «Вентилятор», ПС4.2.2.3 «Вал вентилятора в сборе» развернут относительно уровня элементов 4.2.2.3.1 «Ремень клиновой», 4.2.2.3.2 «Шкив», 4.2.2.3.3 «Вал», 4.2.2.3.4 «Подшипник 1 на стороне шкива», 4.2.2.3.5 «Подшипник 2».

Задачей нисходящего структурного анализа является расчет ВБР деталей и других элементов вентилятора очистки по заданной ВБР ТС.

Заданная ВБР ТС  $P(T) = 0,8$ .

Вид взаимодействия ПС и элементов — последовательный.

Стоимости восстановления ПС в у.е. приведены в таблице для каждого рассмотренного уровня.

Расчеты параметров надежности системы:

ОР ВБР системы (15)

$$X = \lg P(T) = \lg 0,8 = -0,096910.$$

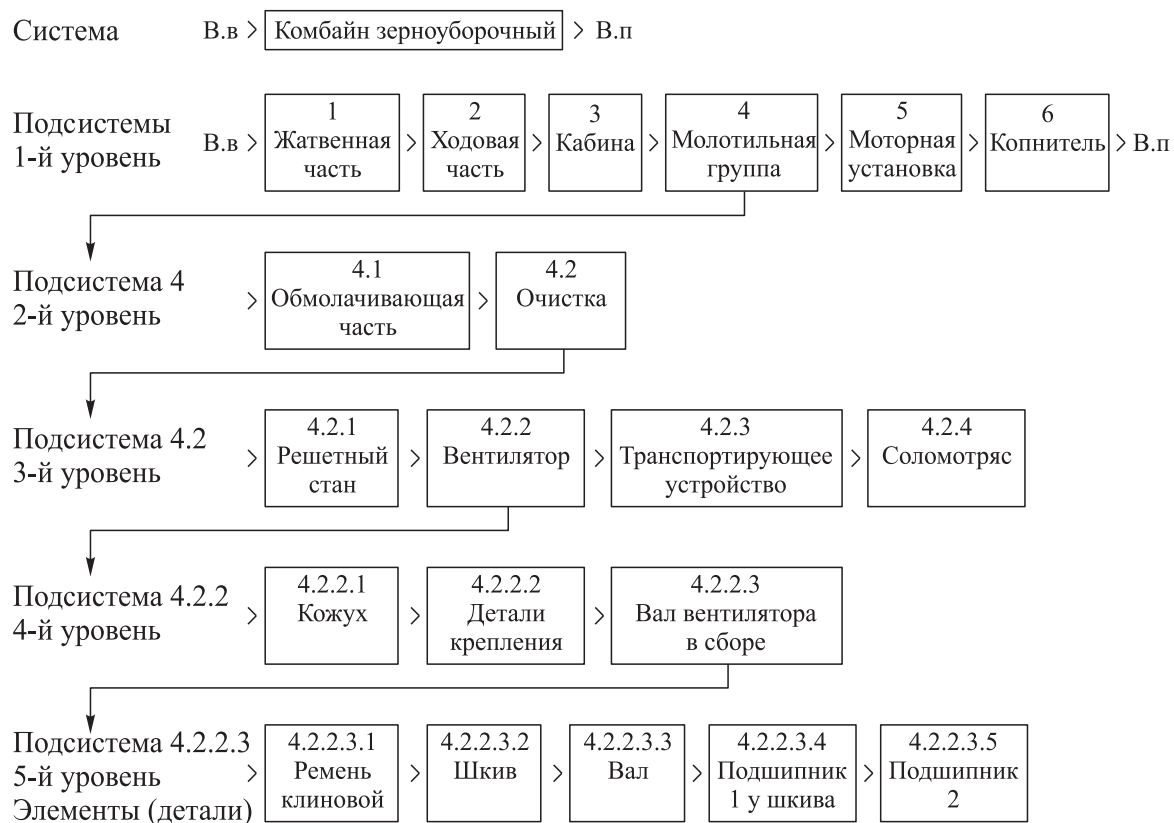


Рис. 3. Структурная схема надежности зерноуборочного комбайна

## Расчет ВБР ПС и элементов ТС «Комбайн зерноуборочный»

Объект	Стоимость восстановления $C_i$ , у.е.	$1/C_i$	Весовой коэффициент $a_i$ (17)	ОР $X_i$ (18)	ВБР $P_i(T)$ (14)
ТС				-0,096910	0,8
ПС 1	200 000	0,000005	0,110294	-0,010689	0,975689
ПС 2	300 000	0,000003	0,073529	-0,007126	0,983726
ПС 3	120 000	0,000008	0,183824	-0,017814	0,959811
ПС 4	500 000	0,000002	0,044118	-0,004275	0,990204
ПС 5	150 000	0,000007	0,147059	-0,014251	0,967717
ПС 6	50 000	0,000020	0,441176	-0,042754	0,906245
Контроль суммы и произведения		$\Sigma(1/C_i)$	$\Sigma a_i$	$\Sigma X_i$	$P(T) = \Pi(P_i(T))$
		0,000045	1,000000	-0,096910	0,800000
<b>Анализ ВБР выбранной ПС 1-го уровня</b>					
ПС 4	500000			-0,004275	0,990204
ПС 4.1	150000	0,000007	0,700000	-0,002993	0,993132
ПС 4.2	350000	0,000003	0,300000	-0,001283	0,997051
Контроль суммы и произведения		$\Sigma(1/C_i)$	$\Sigma a_i$	$\Sigma X_i$	$P(T) = \Pi(P_i(T))$
		0,000010	1,000000	-0,004275	0,990204

Окончание таблицы

Объект	Стоимость восстановления $C_i$ , у.е.	$1/C_i$	Весовой коэффициент $a_i$ (17)	ОР $X_i$ (18)	ВБР $P_i(T)$ (14)	
<b>Анализ ВБР выбранной ПС 2-го уровня</b>						
ПС 4.2	350 000			-0,001283	0,997051	
ПС 4.2.1	120 000	0,000008	0,163934	-0,000210	0,999516	
ПС 4.2.2	80 000	0,000013	0,245902	-0,000315	0,999274	◀
ПС 4.2.3	50 000	0,000020	0,393443	-0,000505	0,998839	
ПС 4.2.4	100 000	0,000010	0,196721	-0,000252	0,999419	
Контроль суммы и произведения		$\Sigma(1/C_i)$	$\Sigma a_i$	$\Sigma X_i$	$P(T) = \Pi(P_i(T))$	
		0,000051	1,000000	-0,001283	0,997051	
<b>Анализ ВБР выбранной ПС 3-го уровня</b>						
ПС 4.2.2	80 000			-0,000315	0,999274	
ПС 4.2.2.1	15 000	0,000067	0,235294	-0,000074	0,999829	
ПС 4.2.2.2	5000	0,000200	0,705882	-0,000223	0,999487	
ПС 4.2.2.3	60 000	0,000017	0,058824	-0,000019	0,999957	◀
Контроль суммы и произведения		$\Sigma(1/C_i)$	$\Sigma a_i$	$\Sigma X_i$	$P(T) = \Pi(P_i(T))$	
		0,000283	1,000000	-0,000315	0,999274	
<b>Анализ ВБР выбранной ПС 4-го уровня</b>						
ПС 4.2.2.3	60 000			-0,000019	0,999957	
ПС 4.2.2.3.1	7000	0,000143	0,237624	-0,000004	0,999990	◀
ПС 4.2.2.3.2	10 000	0,000100	0,166337	-0,000003	0,999993	
ПС 4.2.2.3.3	30 000	0,000033	0,055446	-0,000001	0,999998	◀
ПС 4.2.2.3.4	8000	0,000125	0,207921	-0,000004	0,999991	◀
ПС 4.2.2.3.5	5000	0,000200	0,332673	-0,000006	0,999986	◀
Контроль суммы и произведения		$\Sigma(1/C_i)$	$\Sigma a_i$	$\Sigma X_i$	$P(T) = \Pi(P_i(T))$	
		0,000601	1,000000	-0,000019	0,999957	

Для того чтобы эти результаты были исходными данными для расчета и подбора элементов с заданным уровнем надежности, необходимо принять требуемую наработку ТС и всех ее элементов. Поскольку продолжительность работы комбайна в год не превышает четырех месяцев, то для данного примера назначаются:  $T_k \cdot 365K_{год} = 100$  сут — для формулы (1);  $K_{сут} = 0,9$ ;  $ПВ = 1$ .

Тогда требуемая наработка составит  $T = 100 \cdot 24 \cdot 0,9 = 2160$  ч.

Для обеспечения этой наработки, согласно анализу ВБР выбранной ПС 4-го уровня (см. таблицу), выделенные (◀) элементы должны быть выбраны по проектным нагрузкам с ВБР:

4.2.2.3.1 «Ремень клиновой»  $P(T)_{4.2.2.3.1} = 0,999990$ ;

4.2.2.3.4 «Подшипник 1 на стороне шкива»  $P(T)_{4.2.2.3.4} = 0,999991$ ;

4.2.2.3.5 «Подшипник 2»  $P(T)_{4.2.2.3.5} = 0,999986$ ;

4.2.2.3.3 «Вал» должен быть рассчитан с использованием статистической модели накопления усталостного повреждения с ВБР  $P(T)_{4.2.2.3.3} = 0,999998$ .

По размерам и конструктивным параметрам изделий 4.2.2.3.1–4.2.2.3.3, полученным на стадии эскизного проекта, должны быть определены достигнутые ресурсы (по соответствующим моделям надежности с расчетными ВБР, см. таблицу). Затем можно принять меры для сближения достигнутых и заданного ресурсов [10–12].

**Заключение.** Разработан и проверен на численных примерах метод нисходящего анализа структурных схем надежности машин, алгоритм которого совпадает с последовательностью стадий проектирования: от ВБР машины к ВБР деталей. Выбор требуемой наработки и распределение ВБР по деталям на начальных стадиях проекта обеспечивает на последующих стадиях возможность проектирования с заданным уровнем безотказности.

Для универсализации связей между элементами при наличии сложных функциональных связей структурная схема надежности может строиться на основе структуры конструкции.

Математические модели структурных схем просты, доступны для расчетов на ранних стадиях проекта, одинаково эффективны для последовательно взаимодействующих, резервированных и комбинированных схем надежности, дают удобные возможности алгоритмизации, программирования и коррекции данных.

Из моделей надежности структурных схем устранена необходимость использования экспоненциального закона. Анализ ВБР опирается только на фундаментальные свойства надежности, общие для всех технических объектов и систем. Алгоритм анализа сохраняется на всех уровнях структурных схем, включая уровни деталей.

Критерием ранжирования ВБР элементов выбрана стоимость восстановления элемента в случае его отказа.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Маньшин Ю.П., Маньшина Е.Ю. Планирование и оценка надежности технической системы на ранних стадиях проекта. *Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Мат. 7 Междунар. науч.-практ. конф.* Ростов н/Д, ДГТУ, 2014, с. 169–171.

- [2] Ковалев А.П., Кантор В.И., Можяев А.Б. Экономическое обеспечение надежности машин. М., Машиностроение, 1991.
- [3] Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., Машиностроение, 1975.
- [4] Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [5] Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб., БХВ-Петербург, 2006.
- [6] Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. М., Энергия, 1977.
- [7] Маньшин Ю.П., Маньшина Е.Ю. Расчеты параметров надежности элементов при проектировании машин. *Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Мат. 10 Междунар. науч.-практ. конф.* Ростов н/Д, ДГТУ, 2017, с. 261–263.
- [8] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М., Наука, 1965.
- [9] Хозяев И.А. Надежность биотехнических систем. Ростов н/Д, ДГТУ, 2014.
- [10] Маньшин Ю.П., Маньшина Е.Ю. Расчет параметров надежности технической системы на заключительных стадиях проекта. *Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Мат. 7 Междунар. науч.-практ. конф.* Ростов н/Д, ДГТУ, 2014, с. 171–175.
- [11] Маньшин Ю.П., Маньшина Е.Ю. Приближенная оценка ресурса детали, обеспечивающая ее требуемый ресурс с заданной вероятностью безотказной работы. *Вестник машиностроения*, 2017, № 12, с. 20–24.
- [12] Man'shin Yu.P., Man'shina E.Yu. Estimating the life of a machine part. *Russ. Engin. Res.*, 2018, vol. 38, no. 3, pp. 157–161. DOI: 10.3103/S1068798X18030103

**Маньшин Юрий Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (Российская Федерация, 344000, г. Ростов-на-Дону, Ростовская обл., пл. Гагарина, д. 1).

**Маньшина Елена Юрьевна** — старший преподаватель кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (Российская Федерация, 344000, г. Ростов-на-Дону, Ростовская обл., пл. Гагарина, д. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Маньшин Ю.П., Маньшина Е.Ю. Вопросы надежности деталей при проектировании механических систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 56–73. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-56-73



---

## PROBLEMS OF PARTS RELIABILITY IN THE DESIGN OF MECHANICAL SYSTEMS

**Yu.P. Manshin**  
**E.Yu. Manshina**

manshin@mail.ru  
elemans@mail.ru

**Don State Technical University, Rostov-on-Don, Rostov Region, Russian Federation**

---

### Abstract

The paper deals with the problems of rationing reliability indicators in the early stages of machine design, which allow the designer to develop the entire list of crucial parts in terms of reliability, and provide a given level of reliability. By analyzing the existing methods of rationing the reliability, we revealed their insufficiency for design, as well as contradictions associated with the use of the exponential law of reliability for this purpose. We synthesized an alternative approach to rationing, which makes it possible to perform a complete structural analysis of the project: from the reliability of the system as a whole to the parts, whose reliability determines the reliability of machines. At the structural level of parts and other elements whose failures are not sudden, the use of the exponential law is eliminated, but the inherent simplicity of mathematical operations is preserved

### Keywords

*Reliability, probability, failure-free performance, operating time, machine, technical system, element*

Received 09.10.2018  
© Author(s), 2019

---

### REFERENCES

- [1] Man'shin Yu.P., Man'shina E.Yu. Planning and evaluation of technical system reliability at the early project stages. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya. Mat. 7 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Current state and development prospects of agricultural machine engineering. Proc. 7th Int. Sc.-Tech. Conf.]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2014, pp. 169–171 (in Russ.).
- [2] Kovalev A.P., Kantor V.I., Mozhaev A.B. Ekonomicheskoe obespechenie nadezhnosti mashin [Economic support of machine reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991.
- [3] Dal'skiy A. M. Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnykh detaley mashin [Technological support of high-precision machine parts reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.
- [4] Pronikov A.S. Parametricheskaya nadezhnost' mashin [Parametric machine reliability]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002.
- [5] Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006.

- [6] Druzhinin G.V. Nadezhnost' avtomatizirovannykh system [Reliability of automated systems]. Moscow, Energiya Publ., 1977.
- [7] Man'shin Yu.P., Man'shina E.Yu. [Calculation of elements reliability parameters at machine designing]. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya. Mat. 10 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Current state and development prospects of agricultural machine engineering. Proc. 10th Int. Sc.-Tech. Conf.]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2017, pp. 261–263 (in Russ.).
- [8] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'yev A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in reliability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1965.
- [9] Khozyaev I. A. Nadezhnos' biotekhnicheskikh system [Reliability of biotechnical systems]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2014.
- [10] Man'shin Yu.P., Man'shina E.Yu. [Reliability parameters calculation of technical system at the last project stages]. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya. Mat. 7 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Current state and development prospects of agricultural machine engineering. Proc. 7th Int. Sc.-Tech. Conf.]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2014, pp. 171–175 (in Russ.).
- [11] Man'shin Yu.P., Man'shina E.Yu. Approximate assessment of part life, assuring its required life with specified probability of no-failure operation. Vestnik mashinostroeniya, 2017, no. 12, pp. 20–24 (in Russ.).
- [12] Man'shin Yu.P., Man'shina E.Yu. Estimating the life of a machine part. Russ. Engin. Res., 2018, vol. 38, no. 3, pp. 157–161. DOI: 10.3103/S1068798X18030103

**Manshin Yu.P.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Machinery Engineering Fundamentals, Don State Technical University (Gagarina pl. 1, Rostov-on-Don, Rostov Region, 344000 Russian Federation).

**Manshina E.Yu.** — Assist. Professor, Department of Machinery Engineering Fundamentals, Don State Technical University (Gagarina pl. 1, Rostov-on-Don, Rostov Region, 344000 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Manshin Yu.P., Manshina E.Yu. Problems of parts reliability in the design of mechanical systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 5, pp. 56–73 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-56-73