

## К вопросу о параметрических моделях частичных отказов в технических устройствах

*А.И. Зотов, В.В. Гриценко*

*Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация:** Авторами рассматривается вопрос оценки частичного отказа в технической системе с позиции параметрической надежности. Оценка поведения отказа проводится по таким параметрам как времена наработки до отказа и достижения цели, риски. Под риском в данной работе подразумевается вероятность возникновения последующего отказа (полного или частичного) или перехода произошедшего в полный. Авторы предлагают расширить спектр параметров, характеризующих попадание в отказовое состояние, за счет добавления характеристик возможных деградиционных процессов и значений разрушающих факторов внешней среды в прогнозируемый период продолжения функционирования исследуемого объекта. Также особое внимание уделяется тому, что на вероятность появления частичного отказа оказывают влияние факторы, которые можно разделить на внешние и внутренние, при этом внутренние могут зависеть от внешних.

**Ключевые слова:** частичный отказ, параметрическая надежность, риск, время деградации отказа, диаграмма Исикавы

### Введение

Параметрические модели надежности наиболее полно характеризуют соответствующие свойства исследуемых технических объектов, являются универсальным инструментом проведения расчетов, связанных с решением задач анализа, синтеза, прогнозирования, оценкой эффективности и экономической целесообразности. Однако, методы построения параметрических моделей обладают сложностью математических подходов, часто требуют использования значительных объемов статистических данных, получаемых на различных этапах жизненного цикла исследуемого объекта.

Под параметрической надежностью понимаются вероятность функционирования системы (элемента) с заданной зоной допуска значения выходного параметра. Выход из поля допусков считается отказом.

При рассмотрении частичных отказов (ЧО) такой подход требует корректировки, так как частичная потеря функций или снижение качества

выполняемых функций – это тоже выход из допуска, определяемого технической документацией. [1, 2].

В настоящее время классический подход к оценке параметрической надежности связан с созданием вероятностных моделей, учитывающих полученные статистическими методами законы распределения внутренних и внешних факторов, влияющих на показатели надежности, с привязкой их к конкретному изделию и условиям его функционирования. С усложнением объектов исследований резко усложняются и программы надежностных исследований. Поэтому такой подход в основном применим к относительно простым, часто однофункциональным устройствам [3].

**Цель настоящей статьи** – рассмотреть в надежностном аспекте параметрический подход к управлению, многофункциональными устройствами, обладающими высокой производительностью и эксплуатирующимися в условия, когда ЧО приводит к ситуации, связанной с выбором стратегии последующего поведения – проводить восстановительные операции или, воспользовавшись сохранением определенных возможностей, продолжать работу до наступления сроков или создания условий проведения плановых ремонтно-восстановительных работ.

Такие объекты (например, горные машины, транспортные средства для перемещения крупногабаритных и обладающих большой массой грузов, летательные аппараты в полете и морские суда в плавании и т.п.) характеризуются сложным структурным составом, многочисленными функциональными связями и различными состояниями, определяемыми внутренними и внешними факторами. В свою очередь, их использование в частично-неисправном состоянии связано с определенными рисками, оценить которые можно лишь, обладая необходимой информацией о последствиях ЧО [4].

Решение задачи выбора стратегии действий после возникновения ЧО возможно осуществить, определив значение наработки на отказ  $\tau_{отк}$  для той части аппаратуры объекта, которая может продолжать функционировать после момента возникновения ЧО. Тогда, для такого выбора, необходимо просто оценить условие:

$$\tau_{отк} < \tau_{д.ц.} - \text{восстановление};$$

$$\tau_{отк} \geq \tau_{д.ц.} - \text{продолжение работы.}$$

Здесь  $\tau_{д.ц.}$  - время, необходимое для достижения цели, определенное лицом, принимающим решение.

Анализ проводимых исследований в области параметрической надежности показал, что такой подход не только труднодостижим, но и может оказаться некорректным. Значение  $\tau_{отк}$  является сложной функциональной величиной, интегрирующей в себе практически все вероятностные факторы, возникающие на разных этапах жизненного цикла (разработка, изготовление, эксплуатация). При ЧО, наработка на отказ дополнительно получает зависимость от параметров этого ЧО [5].

Для упрощения методов исследований и доведения их до уровня практического использования в некоторых источниках предложены оригинальные новые подходы (например, на основе диффузионного распределения [6]), но их применение так же возможно лишь на этапах разработки, испытаний или решений задач по совершенствованию надежностных показателей в процессе эксплуатации (организация обслуживания, доработки и т.д.) Вместе с тем, существующие математические параметрические модели не отвечают требованиям оперативного управления надежностью в условиях ЧО, Фактически это основная ветвь алгоритмов управления по состоянию.

---

В таких условиях упор необходимо делать на экспертные системы, поддерживая их работу полезной информацией о надежности характеристик отдельных устройств, эксплуатационных нагрузках и состояниях объекта. При полном отказе цель диагностирования определяется необходимостью получения информации, направленной на решение задач восстановления (место, вид, причина отказа). При ЧО цель сбора диагностической информации дополняется – определением рисков, связанных с продолжением функционирования частично-отказавшего технического объекта. Это усложняет диагностические процедуры, так как добавляется следующее:

- выявление режимов возможного продолжения функционирования после проявления ЧО;
- оценка временных параметров деградации и распространения ЧО в выбранном режиме продолжения функционирования;
- подтверждение или опровержение гипотез о направлениях развития разрушающих факторов в прогнозируемый период продолжения функционирования.

Можно выделить два вида факторов, оказывающих влияние на надежность изменения в продолжающем функционировать после ЧО техническом устройстве – внутренние и внешние.

Внутренние факторы, действующие до ЧО, сохраняются. К ним могут добавиться еще какие-то, вызванные ЧО. При этом физико-химические процессы разрушения материалов могут претерпевать изменения. Скорости процессов механического разрушения деталей зависят от свойств материалов, обработки, формы, напряжения нагрузки и температуры. В большинстве случаев, факторы при продолжении функционирования не изменяются, кроме нагрузки и температуры. Экспериментально получена

---

зависимость – между ресурсом материала (наработкой до отказа)  $t_p$  напряжением и температурой []:

$$t_p = \tau_o e^{\frac{-w_o - \gamma_\zeta}{RT}}$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $w_o$  - начальная энергия активации процесса разрушения;  $(w_o - \gamma_\zeta)$  – энергия активации разрушения;  $\tau_o$  – параметр, характеризующий колебательные процессы в кристаллической решетке твердого тела  $\tau_o = 10^{-12} \pm 10^{-14} c$ ,  $\gamma$  – коэффициент чувствительности материала к напряжению.

Соответствуют аналитические соотношения для распространения трещин, трибологических процессов, абразивного изнашивания, воздействия коррозии и окислов. Они также сложны в применении, так как тесно привязаны к конкретным деталям и процессам.

Такие расчетные соотношения для оперативных оценок при управлении надежностью не приемлемы.

Можно предложить другой подход, взяв за основу некоторые характеристики функционального взаимодействия элементов системы, состоящей из частично отказавших и продолжающих исправно функционировать после ЧО. ЧО оказывает влияние по таким параметрам как механическое напряжение, информационная нагрузка, температурное перераспределение, энергопотребление, временные сдвиги и другим.

Условно это взаимодействие оценим в вероятностной шкале. Введем обозначения и построим вероятностную масштабную шкалу:

- +++ – сильное (0,75 – 1,0);
- ++ – среднее (0,5 – 0,75);
- + – слабое (0,1 – 0,3);

– пренебрежительно малое (0 – 0,1).

Рассмотрим некоторую условную систему, включающую 9 подсистем, в каждой из которых может произойти ЧО и установим степень возможного влияния этого отказа на функциональную нагрузку в других подсистемах, используя введенные обозначения, как это приведено в таблице 1. Вместо названий подсистем в таблице произведено их разделение по принципу, определяющего их назначение и содержание. Таблица может предоставить некоторую информацию о значимости оборудования в комплексной оценке распределения функциональной нагрузки на подсистемы в условиях ЧО.

Таблица 1. Вероятностных уровней взаимодействия различных подсистем при проявлении ЧО

№, п/п	Основное оборудование, подсистем с ЧО	Номера подсистем, в которых произошел ЧО								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Электронное	+++	+	++	+++	-	-	-	-	+
2	Электросиловое (сильноточное)	+	+++	++	+	-	-	-	-	-
3	Электропитающее (среднеточное)	+	+++	+++	++	-	-	-	-	-
4	Электропреобразующее (слаботочное)	++	++	+++	+++	-	-	-	-	-
5	Механическое	+	+	+	+	+++	+++	++	++	+
6	Гидравлическое	+	+	+	+	++	+++	+	-	-
7	Пневматическое	+	+	+	+	++	-	+++	-	+
8	Энергоснабжающее	+	+	++	+	+	+	+	+++	-
9	Специальное	++	++	+	++	-	-	-	-	+++
	Зависимость	13	15	16	15	8	7	7	5	6

Для различных исследуемых объектов содержание таблиц может изменяться в любую сторону. В данном примере в качестве объекта подразумевался карьерный экскаватор, который обладает хорошо выделяемыми подсистемами и обладает производительностью, позволяющей ставить вопрос о стратегии выбора решений в условиях ЧО [8].

Под специальным оборудованием понимались устройства, определяющие специфику использования объекта в различных условиях применения.

Такой подход не может претендовать на метод параметрической оценки ЧО, но он может определять направление сбора параметрической информации для экспертных систем по каждому отдельному объекту на всех этапах его жизненного цикла [9].

Важным является вопрос параметрической оценки влияния внешних факторов на деградационные характеристики ЧО. В целом такие влияния ничем не отличаются от тех, которые рассматриваются при анализах причин полных отказов. Достаточно подробная классификация внешних воздействующих факторов приведена в [10]. В определенных случаях ЧО могут приводить к усилению влияния внешних факторов, особенно если в ЧО будет находиться оборудование, выполняющее функции защиты от воздействия именно этих факторов. Кроме этого, внешние факторы могут сами являться причиной ЧО. Например, последствия механического удара или воздействия биологических вредителей. Наглядно можно показать причинно-следственные связи для скорости деградационных процессов при ЧО, используя диаграмму Исикавы (рис. 1). На диаграмме приведены основные внешние факторы, ускоряющие процессы параметрических изменений в системах, продолжающих функционирование в условиях ЧО.

В процессе принятия решений с продолжением функционирования устройств о продолжении функционирования устройств внешние факторы должны учитываться обязательно. Пока это возможно только экспертным путем.

Временные параметры в моделях распространения отказов играют решающую роль в оценках эффективности принимаемых решений. Однако конкретные прогнозы (даже с низкой вероятностью) возможно лишь при получении больших объемов информации о месте, виде и причинах возникшего отказа. Наглядный пример – разгерметизация одного из отсеков международной космической станции (МКС) в 2018г. [5, 6]

---

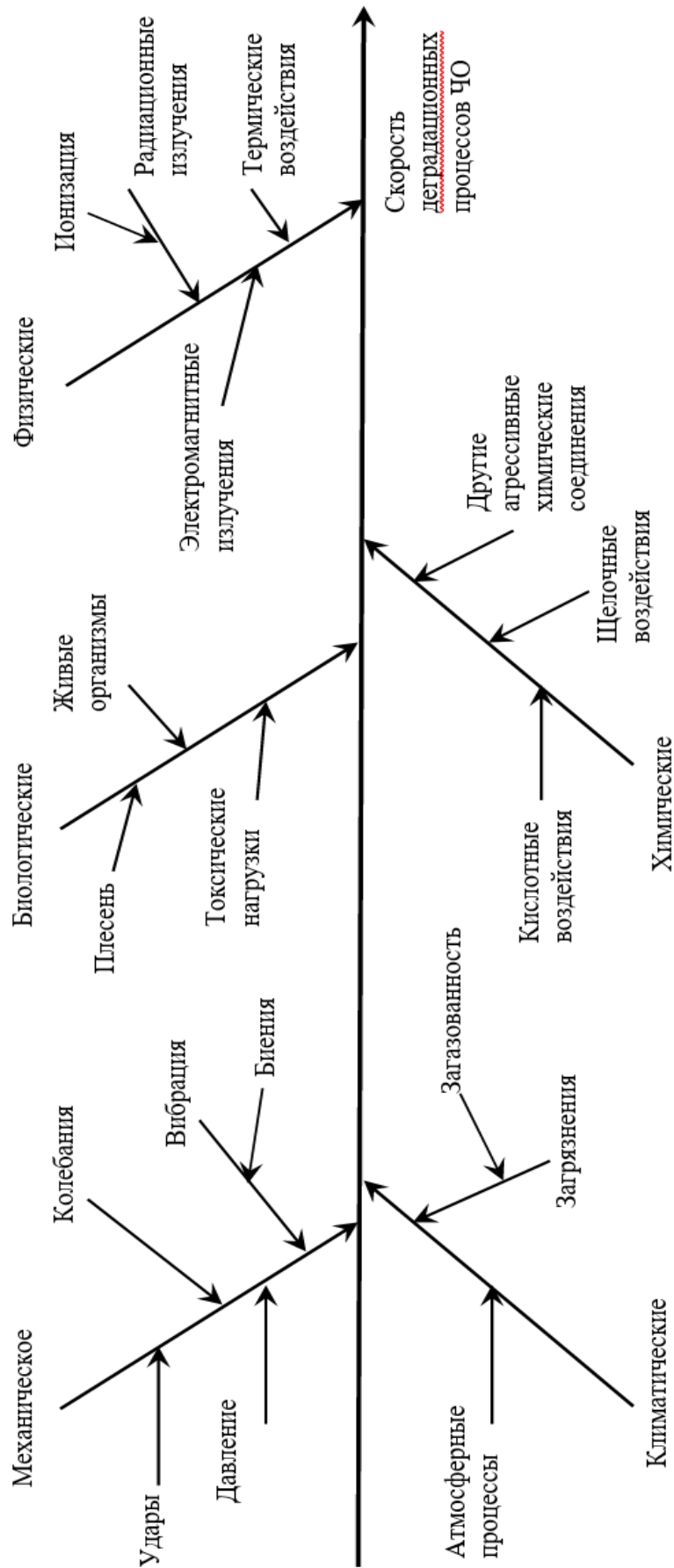


Рис. 1. Диаграмма Исикавы для зависимости скорости деградиционных процессов ЧО



Сбор информации о типичном ЧО потребовал время для правильной экспертной оценки ситуации и принятия решения о продолжении функционирования. Время следует увязать со скоростями распространения ЧО, которые зависят от мест и видов отказовых изменений.

Предлагается использовать деградационный подход, позволяющий его применить в оценочных действиях. Можно считать его таким, как это показано в таблице 2 .

Таблица 2

№ п/п	Наименование скорости распространения ЧО	Примерные значения временных параметров распространения ЧО	Распространенные случаи наблюдения в технических устройствах при ЧО.
1	Большая	Минуты, единицы часов	Потеря герметичности, перегревы, перерасходы ограниченного ресурса
2	Средняя	Единицы суток, недели	Разбалансировка, износы, электрические разрушительные процессы
3	Малая	Месяцы	Загрязнения, коррозионные процессы, разрушение защитных покрытий, деформации
4	Пренебрежительно малая	Годы	Усталость материалов, изменение прочностных характеристик и другие негативные последствия старения материалов

Таблица возможных времен распространения ЧО на взаимодействующие устройства.

В настоящее время статистико-вероятностные модели процессов деградации в технических системах часто составляются на основе DM (диффузионно-немонотонных) и DM (диффузионно-немонотонных) распределений [1]. Эти распределения хорошо отображают временные изменения параметров надежности в зависимости от времени и условий протекания деградационных процессов. Однако, их использование связано с необходимостью оценивания экспериментальных данных из многомерных выборок. Поэтому такие модели больше подходят для исследований относительно простых технических устройств и систем на этапах испытаний при накоплении статистических данных в эксплуатационных режимах. При

объемах выборки в несколько сотен значений и корректном использовании критериев эмпирические и теоретические оценки характеристик распределений согласия дают ошибки (расхождения) измеряемые единицами процентов. В системах принятия решений и база знаний экспертных систем возможен подход, когда после ЧО продолжающая функционировать аппаратура считается как бы "другой" системой, с изменившимися надежностными характеристиками. Для этого состояния возможен поиск в базе знаний прецедента с данными, позволяющими решить задачу прогноза с результатом, помогающим принять правильное решение о возможности продолжения функционирования в условиях ЧО.

### **Выводы**

1. Параметрические модели надежности при ЧО должны отображать деградационные процессы так же, как и при полных отказах, но с учетом произошедших структурных или функциональных изменений, вызванных ЧО
2. Для принятия решения о возможности и целесообразности продолжения функционирования объекта после ЧО, необходимо определиться с временными параметрами деградационных процессов, вызванных ЧО. Это возможно при достаточности данных, определяющих постановку и решение задачи прогноза. В настоящее время такая задача решается после проведения экспертных оценок.
3. При накоплении информации о влияниях ЧО на надежностные параметры систем и их элементов достоверности прогнозов, необходимых для управления надежностью и принятия решений по состоянию будет увеличиваться.

## Литература

1. Стрельников В.А. О возможности применения диффузионного распределения для оценки надежности технических устройств по результатам испытаний // Управляющие системы и машины №3 1981 С.9-12
2. Зотов А.И., Гриценко В.В., Черпаков А.В. Частичный отказ в теории надежности. // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_156N4y18\\_Gricenko.pdf\\_935280522c.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_156N4y18_Gricenko.pdf_935280522c.pdf)
3. Переверзев Е.С., Чункаов Л.Д. Параметрические модели отказов и методы оценки технических систем. // АН УССР, Институт технической механики – Киев, 1989г. С.183.
4. Tsarouhas P.H. Arvanitoyannis I.S. Yogust production line: reliability analysis. Production and manufacturing research, vol. 2, 2014 pp.11-23
5. Беркетов Г.А., Цуркин А.П., Головкин Д.В. Прогнозирование остаточного ресурса технических систем с помощью параметрических моделей изменения надежности. Экономика, Статистика и Информатика, №1, 2013г. С.137-140
6. Грибов В.Н., Кафанов Ю.И., Стрельников В.П. Оценивание и прогнозирование надежности бортового аэрокосмического оборудования. Под ред. НИУ ВШЭ Ю.И. Кофанова – М. 2013 С.65-66
7. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. Изд. Стандартов – М.: 1989 С.45-54
8. Зотов А.И., Гриценко В.В., Модель выбора решения о продолжении функционирования технического объекта в условиях частичного отказа по критерию экономической целесообразности. // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_144\\_Zotov\\_N.pdf\\_5ce4a02e25.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_144_Zotov_N.pdf_5ce4a02e25.pdf)

9. Зотов А.И., Гриценко В.В., Черпаков А.В. О понятии частичный отказ в горных машинах. «Системный анализ, управление и обработка информации», т.2 2017, С.45-47

10. Cox D.R., Oakes D. Analysis of survival data. Roca Ration, New York: Chapman&Hall/CRC, 1984 pp.208

### References

1. Strelnikov V.A. Upravlyayushie sistemy i mashiny. №3 1981 pp. 9-12

2. Zotov A.I., Gricenko V.V., Cherpakov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_156N4y18\\_Gricenko.pdf\\_935280522c.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_156N4y18_Gricenko.pdf_935280522c.pdf)

3. Pereverzev E.S., Chunkaov L.D. Parametricheskie modeli otkazov i metody ocenki tekhnicheskikh sistem. [Parametric failure models and methods for evaluating technical systems]. AN USSR, Institut tekhnicheskoy mehaniki. Kiev, 1989г. 183 p.

4. Tsarouhas P.H. Arvanitoyannis I.S. Yogust production line: reliability analysis. Production and manufacturing research, vol. 2, 2014. pp.11-23

5. Berketov G.A., Curkin A.P., Golovko D.V. Ekonomika, Statistika i Informatika, №1, 2013g. pp. 137-140

6. Gribov V.N., Kafanov Yu.I., Strelnikov V.P. Ocenivanie i prognozirovanie nadezhnosti bortovogo aerokosmicheskogo oborudovaniya [Evaluation and prediction of the reliability of onboard aerospace equipment]. 2013. pp.65-66

7. Kubarev A.I. Nadezhnost v mashinostroenii [Reliability in mechanical engineering]. 1989 pp. 45-54

8. Zotov A.I., Gricenko V.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_144\\_Zotov\\_N.pdf\\_5ce4a02e25.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_144_Zotov_N.pdf_5ce4a02e25.pdf)

9. Zotov A.I., Gricenko V.V., Cherpakov A.V. Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii, №2 2017, pp.45-47.



10. Cox D.R., Oakes D. Analysis of survival data. Roca Ration, New York: Chapman&Hall/CRC, 1984 pp.208