

---

## Модель деградации частичного отказа в технической системе

*А.И. Зотов, В.В. Гриценко*

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

**Аннотация:** В работе освещена проблема моделирования частичного отказа, показаны основные отличительные особенности частичного отказа от полного. Также предоставлена диаграмма развития возможных деградационных процессов ЧО, в частности, перерастание в другие частичные отказы или в полный отказ. Разработаны предложения по последовательности проведения операций идентификации отказов на уровне обобщенного алгоритма. Рассмотрен иллюстративный пример на основе неисправностей электрической машины, представлена диаграмма возможных отказов и их взаимосвязей. Делается вывод о необходимости использования экспертных оценок при построении моделей деградации частичных отказов в технической системе.

**Ключевые слова:** частичный отказ, полный отказ, деградационное распространение отказа, диагностическая задача, электрическая машина.

### Введение.

Процесс моделирования частичного отказа (ЧО) проходит через три стадии в своем развитии. Это стадии детерминизма, стохастичности и адаптивности. Они соответствуют трем видам информации о развитии ЧО: определенность, неопределенность, незнание.

Примером информации для первой стадии развития могут служить данные, на основании которых можно судить о состоянии технического объекта, структурные и функциональные схемы взаимодействия подсистем, устройств, узлов и других элементов. Сюда относятся алгоритмы управления, данные о режимах, характеристики систем контроля и диагностирования, методы эксплуатации и технической поддержки.

### Анализ особенностей ЧО.

В таком информационном пространстве решаются вопросы разработки действий, связанных с поведением в условиях, когда ЧО и его характеристики определены, последствия известны, возможности учтены [1]. Основа разработки – появление различных инструкций, указаний, решений оптимизационных детерминистских задач, программ обучения обслуживающего персонала. Практика такого подхода широко

распространена, хотя недостатки его очевидны[2]. Это отсутствие учета неопределенности, которыми характеризуются реальные результаты работы устройств контроля и диагностирования, оценки влияния внешних воздействий, надежностных параметров человеко-машинного взаимодействия (ЧМВ) [3].

Стохастический подход предполагает известными статистические характеристики процессов, связанных с ЧО в техническом устройстве во всех стадиях его становления (появление, обнаружение, распознавание, развитие). Часто в полном объеме (или даже необходимом для решения конкретных задач управления надежностью) такая информация отсутствует. В этих случаях задачи идентификации, фильтрации и прогнозирования решаются с некоторой точностью, зависящей от объемов и достоверности статистической информации полученной и накопленной в процессе эксплуатации или (что хуже) статистического моделирования. Для изучения ЧО в стохастическом пространстве используются различные модели, в которых точные характеристики систем заменяются их статистическими эквивалентами.

Второй подход частослужит продолжением и развитием первого, когда, получив решения на первом шаге, на втором – происходит замена характеристик системы их статистическими эквивалентами, что важно с точки зрения движения к оптимальному управлению надежностью.

Третий вид информации (для решения практических задач) связан с ситуациями, когда начальные состояния недоопределены, статистические характеристики заранее не рассчитаны и не могут быть использованы в управлении. В таких случаях находят место подходы, когда основное значение приобретает текущая информация, поступающая при анализе реакции на воздействия. Алгоритмы таких воздействий должны строиться таким образом, чтобы информация о структурных изменениях в системе

постоянно пополнялась при общем направлении движения системы к безопасному и оправданному с позиций наилучшего использования. Это наиболее сложные этапы анализа и моделирования. Для реализации используются принципы поддержки принятия решений, задействования экспертных систем, адаптации в управлении.

В стадии детерминизма для ЧО невозможно обойти задачи построения диагностических моделей. С учетом особенностей таких отказов и их выделения в задачах идентификации диагностические модели должны строиться по принципу функционального контроля режимов. Это означает, что к основным задачам диагностирования (определение места, причины и вида отказов) добавляется задача поиска и контроля режимов возможного продолжения функционирования объекта по назначению. Такая модель может быть представлена в алгоритмической форме [4]. Обобщенный алгоритм может быть таким, как это представлен на рис. 1. Заметим, что такой алгоритм составлен из условия, что основная диагностическая задача решена, т.е. место, вид и причины отказа установлены достоверно. В сложных технических системах последнее чаще всего не соблюдается, а точность решения задач контроля и диагностирования оценивается соответствующими вероятностями. В вероятностном пространстве справедливо могут ставиться и решаться задачи, обозначенные в условных операторах алгоритма. Кроме этого, на этой стадии фактически не ставится задача оценки развития ЧО, т.е. не учитывается динамика структурных изменений в объекте в результате перераспределения нагрузки. Учет сказанного перемещает задачи моделирования поведения систем с ЧО в стадию стохастичности[5].

Типичной задачей второй (стохастичной) стадии является построение модели развития ЧО. В таких моделях должны найти отображение вероятностные и временные параметры деградиционных процессов для

случаев, когда их источником является ЧО. Возможные варианты структурной деградации изделия по отказам приведены на диаграмме (рис.2).

Рассмотрение диаграммы показывает, что, во-первых, построение модели может быть осуществлено с использованием марковской ациклической сети (графа), так как петли в диаграмме отсутствуют. Такая модель обладает особенностью, что оперирует только с текущими состояниями (без учета предыстории)[6]. Это значит, что необходимо находить и оценивать структурные изменения для каждого состояния, а затем рассчитывать все переходы между состояниями.

Во-вторых, просматривается байесовская цепь (сеть), которая может быть представлена ориентированным ациклическим графом  $G = (V, EE_j)$ , отражающие переходы от одних узлов к другим, время рассмотрения соответствующих переходов  $(\tau_i^{ПО}, \tau_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , вероятность таких переходов за рассматриваемое время:  $P(\tau_i^{ПО}), P(\tau_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$

Решения подобных задач возможно упростить, если зафиксировать время, основываясь на некоторых смысловых условиях, относящихся к исходным данным[7]. Например, в задаче принятия решений в условиях проявления ЧО таким временем может стать временной интервал, между моментом возникновения ЧО и началом следующего планового технического обслуживания [8]. Тогда

$$\tau_i^{ПО} = \tau_i = \tau, \forall i \in n$$

В этом случае в предложенной модели будут в качестве аргументов рассматриваться только  $P(\tau)$  – для полных отказов и  $P(\tau_i)$  – для ЧО ( $i = \overline{1, n}$ ).

### **Анализ ЧО на примере электрической машины.**

В качестве иллюстрационного примера рассмотрим исследование поведения тягового двигателя в условиях проявления в нем ЧО. Такие двигатели находят широкое применение в многочисленных современных силовых устройствах и машинах, а так же рассматриваются в качестве

---

основных в перспективном развитии (электромобили, робомобили и т.д.). Это электрические машины (переменного или постоянного тока) мощностью от 15 до 200 и более кВт. Будем считать, что используется вибродиагностика с применением анализаторов вибраций. В качестве последних можно рассматривать возможности анализатора CSI2140 с программным обеспечением MotorView [9]. Анализатор позволяет с высокой достоверностью диагностировать отказы:

- дефектов обмоток статора (полный отказ);
- дефекты обмоток «беличьей клетки» ротора (ЧО);
- статический эксцентриситет зазора (ЧО);
- статический эксцентриситет с насыщением зубцов (полный отказ);
- динамический эксцентриситет зазора (ЧО);
- динамический эксцентриситет с насыщением зубцов (полный отказ);
- асимметрии и линейные искажения напряжений питания.

Возможны и другие результаты диагностических анализов, относящиеся к выявлению отклонений от нормального функционирования, вызванных различными причинами электромагнитного или электродинамического происхождения.

Фрагмент диаграммы, отображающей возможное развитие ЧО для рассматриваемой ситуации за время, оставшееся до планового обслуживания  $\tau$ , приведен на рис. 2. На диаграмме не показаны вероятности переходов, так как они носят точечный характер, зависящий от среза  $\tau$ . Кроме этого показаны не все переходы (нет полной группы событий). Одно их возможных направлений развития ЧО – нарушение термодинамического режима, приводящее к разрушению изоляционных слоев или коллектора [10].

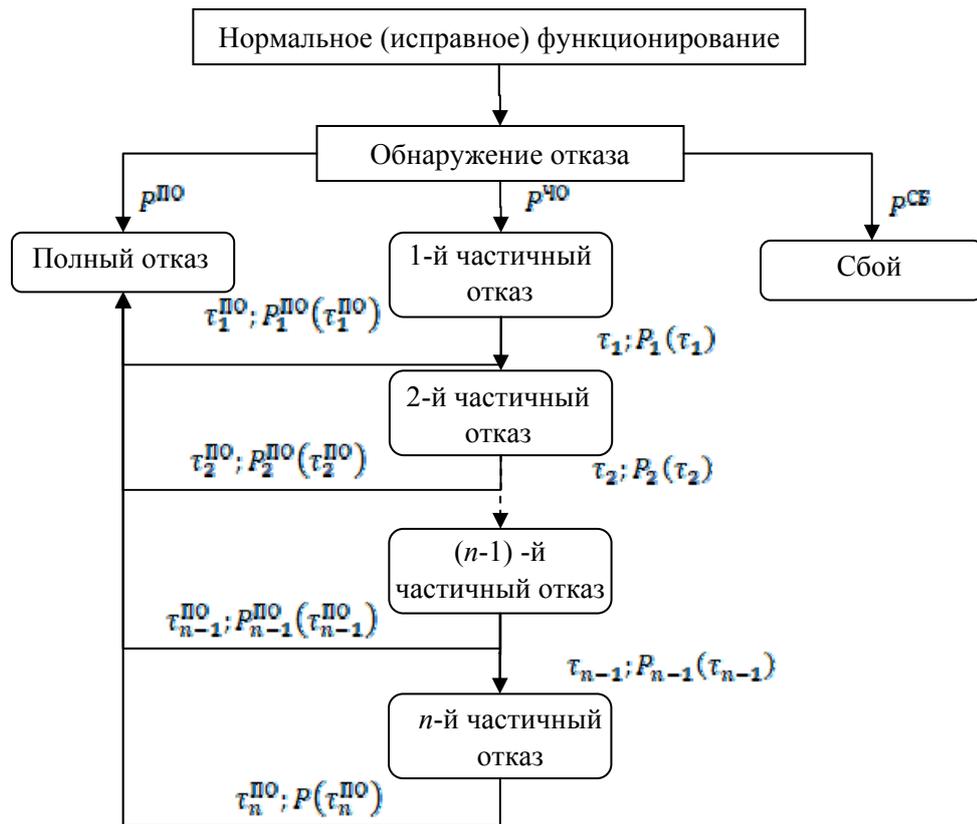


Рис.1. Диаграмма возможных вариантов деградации ЧО

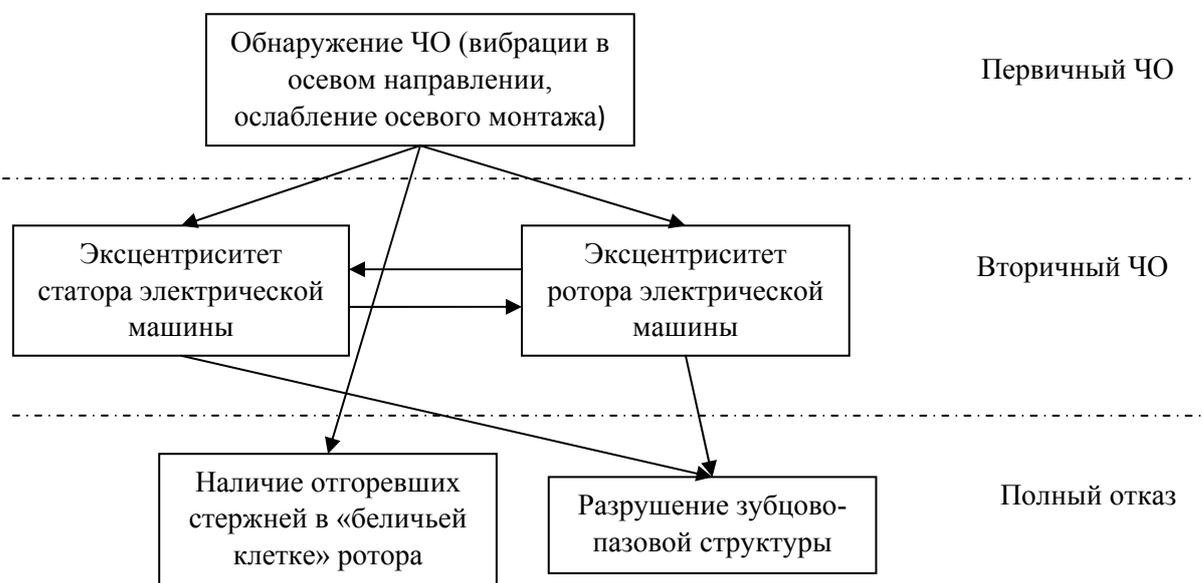


Рис.2. Диаграммы возможного развития ЧО электрической машины.



Рис.3 Блок-схема протекания процесса деградации отказа.

### Вывод.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что модели распространения (развития) ЧО лишь частично могут способствовать достижению поставленной цели – правильному принятию решения и возможности и целесообразности продолжения функционирования объекта в условиях проявления в нем ЧО. Появившиеся неясности и неоднозначности следует разрешить с использованием возможностей экспертных систем.

## Литература

1. 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)
2. 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.
3. Зотов А.И., Гриценко В.В., Черпаков А.В. Разработка системы оперативного контроля состояния человека в системе АПК, X-я юбилейная научно-практическая конференция - Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения, 2017, С. 362-363.
4. Дудюк В.А. Предшествование отказов элементов гидроабразивного оборудования на основе аналитических моделей параметрической и функциональной надежности. Вісник СевНТУ. №1502014, С. 70-74.
5. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Метод расчета надежности авиационных систем с индивидуальным резервированием агрегатов. Сибирский журнал науки и технологий, 2010, С. 106-109.
6. Grabski Franciszek, Applications of semi-Markov processes in reliability. // Reliability: Theory & Applications, 2007, pp.58-73.
7. Петренко С.Е. Параметры надежности эксплуатации насосных станций и мероприятия по их повышению // Инженерный вестник Дона, 2010, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/256](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/256).
8. Zhang Y., Zhang S., Wang J., Zhao M. An integrated approach to estimate storage reliability with initial failures based on e-bayesian estimates. Reliability Engineering & System Safety. V. 1592017, pp.24-36.
9. Генис Я. Оценка надежности системы с периодическим обслуживанием при редких отказах ее элементов. Автоматика и телемеханика. №7, 2010, С. 61-69.



10. Анищенко В.А., Иванова А.Н., Мысло Е.Л. Анализ надежности невосстанавливаемых резервированных систем электроснабжения с учетом множественных отказов. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. № 4. 2014, С. 5-14.

### References

1. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. Inzhenernyj 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)
2. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. Sistemniy analiz, upravlenie i obrabotka informacii, 2017, pp.45-47.
3. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. X-ya yubilejnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Sostoyanie i perspektivy` razvitiya sel'skoxozyajstvennogo mashinostroeniya, 2017, pp.362-363.
4. Dudyuk V.A. Vestnik SevNTU. № 150, 2014, pp.70-74.
5. Bojko O. G., Shajmardanov L. G. Sibirskij zhurnal nauki i texnologij, 2010, pp.106-109.
6. Grabski Franciszek, Reliability: Theory & Applications, 2007, pp.58-73.
7. Petrenko S.E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/256](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/256).
8. Zhang Y., Zhang S., Wang J., Zhao M. Reliability Engineering&System Safety. V. 1592017, pp.24-36.
9. GenisYa. Avtomatika i telemexanika. №7, 2010, pp.61-69.
10. Anishhenko V.A., Ivanova A.N., Myslo E.L. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy i energeticheskikh ob`edineniy SNG. № 4. 2014, pp. 5-14