

**Руководство по стандарту технического обслуживания
для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance, RCM)**

Введение —Термин «техническое обслуживание для обеспечения надежности» (Reliability-Centered Maintenance, RCM) впервые был использован в отчете, написанном специалистами компании United Airlines Ф.С. Ноуланом (F.S. Nowlan) и Х.Ф. Хипом (H.F. Heap) и опубликованном Министерством обороны США в 1978 году. В нем описывались актуальные на тот момент передовые процессы, используемые для разработки программ обслуживания коммерческого авиатранспорта. С тех пор процесс RCM получил широкое распространение в других отраслях и был значительно усовершенствован. Эти усовершенствования отражены в многочисленных документах об использовании, опубликованных самыми различными организациями во всем мире. Многие из этих документов составлены в соответствии с базовыми принципами RCM, изложенными Ноуланом и Хипом.

Тем не менее в процессе разработки некоторых из этих документов ключевые элементы процесса RCM были пропущены или неверно интерпретированы. Из-за растущей популярности RCM на его основе были разработаны другие процессы, авторы которых присваивали им такое же название. В действительности некоторые из них не имеют ничего общего с принципами Ноулана и Хипа. Хотя большинство из этих процессов и позволяет решать некоторые задачи RCM, часть из них явно неэффективна, а часть даже несет в себе значительные риски.

В результате на международном уровне возникла потребность в создании стандарта, определяющего критерии соответствия процесса методологии RCM. Именно в этих целях был разработан стандарт SAE JA1011. SAE JA1011 предполагает достаточно высокий уровень знаний о понятиях и терминологии RCM. Настоящее Руководство расширяет и при необходимости разъясняет эти ключевые понятия и термины, в особенности уникальные для RCM.

Следует обратить внимание на то, что данное Руководство не является инструкцией или процедурным справочником по реализации RCM. Читателям, реализующим RCM, настоятельно рекомендуется более глубоко изучить предметную область и обращаться за консультациями к опытным специалистам, имеющим опыт реализации RCM.

Правила Совета по техническим стандартам SAE гласят: «Настоящий отчет опубликован SAE в целях способствования развитию технических и инженерных наук. Он предоставляется исключительно безвозмездно; пользователь несет полную ответственность за оценку возможности его применения в каждом конкретном случае, а также возникающие в связи с этим нарушения патентных прав.»

Каждый технический отчет пересматривается в SAE не реже, чем каждые 5 лет, в результате чего отчет может быть актуализирован, переработан или снят с публикации. Любые комментарии и предложения, поданные в письменной форме, приветствуются.

ЗАКАЗ ДОКУМЕНТА: (724) 776-4970 ФАКС: (724) 776-0790

ВЕБ-САЙТ SAE <http://www.sae.org>

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|------|---|----|
| 1. | Область документа | 4 |
| 1.1 | Принципы составления Руководства | 4 |
| 2. | Ссылки | 4 |
| 2.1 | Применимые документы | 4 |
| 2.2 | Публикации по теме | 4 |
| 2.3 | Прочие публикации | 5 |
| 3. | Определения | 5 |
| 4. | Аббревиатуры | 7 |
| 5. | Определение ресурсов | 7 |
| 6. | Функции | 8 |
| 6.1 | Условия эксплуатации | 8 |
| 6.2 | Список функций | 9 |
| 6.3 | Описание функций | 11 |
| 6.4 | Стандарты производительности. | 11 |
| 7. | Функциональные сбои | 13 |
| 7.1 | Частичный и полный сбой | 13 |
| 7.2 | Верхние и нижние пределы | 14 |
| 8. | Режимы отказа | 14 |
| 8.1 | Определение режимов отказа | 14 |
| 8.2 | Значение определения «с разумной степенью вероятности» | 15 |
| 8.3 | Уровни обусловленности | 16 |
| 8.4 | Источники информации | 18 |
| 8.5 | Типы режимов отказа | 18 |
| 9. | Последствия отказов | 19 |
| 9.1 | Основные предположения | 19 |
| 9.2 | Необходимая информация | 19 |
| 10. | Категории последствий отказов | 21 |
| | Категории последствий | 21 |
| 10.2 | Оценки последствий отказов | 25 |
| 11. | Выбор политики управления отказами | 25 |
| 11.1 | Взаимосвязь между сроком эксплуатации и отказом 25 | |
| 11.2 | Техническая возможность и целесообразность 26 | |
| 11.3 | Экономическая эффективность 26 | |
| 11.3 | Выбор политики управления отказами 26 | |
| 12. | Управление последствиями отказов | 26 |
| 12.1 | Явные режимы отказов с последствиями для безопасности или окружающей среды 26 | |
| 12.2 | Скрытые режимы отказов с последствиями для безопасности или окружающей среды 29 | |
| 12.3 | Явные режимы отказов с экономическими последствиями 29 | |
| 12.4 | Скрытые режимы отказов с экономическими последствиями 30 | |
| 13. | Политики управления отказами — запланированные задачи | 30 |

SAE JA1012, опубликовано в январе 2002 г.

| | | |
|---------|--|----|
| 13.1 | Задачи по состоянию | 30 |
| 13.2 | Задачи по запланированному восстановлению и запланированному списанию | 36 |
| 13.3 | Задачи по поиску отказов | 37 |
| 13.4 | Комбинация задач 41 | |
| 14. | Политики управления отказами — единовременные изменения и эксплуатация до отказа | 41 |
| 14.1 | Единовременные изменения | 41 |
| 14.2 | Эксплуатация до отказа | 43 |
| 15. | Выбор политики управления отказами | 43 |
| 15.1 | Два подхода 43 | |
| 15.2 | Строгий подход | 44 |
| 15.3 | Подход с использованием схемы принятия решений 45 | |
| 16. | Возможности применения программы | 50 |
| 17. | Математические и статистические формулы | 50 |
| 17.1 | Логические полные 51 | |
| 17.2 | Доступные владельцу или пользователю. | 51 |
| 18. | Важные дополнения 51 | |
| 18.1 | Определение приоритетов ресурсов и постановка целей 51 | |
| 18.2 | Планирование | 52 |
| 18.3 | Уровень анализа и границы ресурсов 52 | |
| 18.4 | Техническая документация 53 | |
| 18.5 | Организация | 53 |
| 18.6 | Обучение 53 | |
| 18.7 | Роль программного обеспечения 54 | |
| 18.8 | Сбор данных | 54 |
| 18.9 | Реализация | 54 |
| 19. | Примечания 55 | |
| 19.1 | Ключевые слова | 55 |
| Рис. 1 | Функционирование насоса | 11 |
| Рис. 2 | Создание условий для ухудшения | 12 |
| Рис. 3 | Режимы отказа насоса | 15 |
| Рис. 4 | Режимы отказа с различными уровнями подробных данных | 17 |
| Рис. 5 | Явный отказ защитной функции | 22 |
| Рис. 6 | Скрытый отказ защитной функции | 23 |
| Рис. 7 | Шесть схем отказа | 25 |
| Рис. 8 | Кривая P-F | 31 |
| Рис. 9 | Интервал P-F | 31 |
| Рис. 10 | Интервал P-F нетто | 32 |
| Рис. 11 | Случайные отказы и интервал P-F | 33 |
| Рис. 12 | Линейная кривая P-F | 34 |
| Рис. 13 | Непостоянные интервалы P-F | 35 |
| Рис. 14 | Безопасные предельные сроки службы | 37 |
| Рис. 15 | Поиск отказов: интервал, доступность и надежность | 39 |
| Рис. 16 | Пример первой диаграммы принятия решения | 48 |
| Рис. 17 | Пример второй диаграммы принятия решения. | 49 |

1. Область документа — SAE JA1012 («Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (RCM)») расширяет и разъясняет все ключевые критерии, перечисленные в документе SAE JA1011 («Критерии оценки для процессов RCM»), а также описывает другие вопросы, важные для успешного применения RCM.

1.1 Принципы составления руководства — Разделы Руководства 5-14, 16 и 17 соответствуют основным разделам SAE JA1011. В разделе 15 более подробно рассматриваются ключевые элементы процесса RCM, которые могут быть объединены для выбора соответствующих политик с целью управления отдельными режимами отказов и их последствиями. В разделе 18 описываются вопросы управления и выделения ресурсов, важные для успешного выполнения RCM.

2. Ссылки

2.1 Применимые публикации — Данный документ основан в различной степени на следующих публикациях. Если не указано иное, используются последние версии публикаций SAE. Применимые версии других публикаций должны действовать на дату заказа. В случае противоречий между текстом документа и содержащимися в нем ссылками приоритет имеет текст документа. Однако информация в данном документе не заменяет содержание соответствующих законов и нормативов, кроме случаев особых исключений.

2.1.1 ПУБЛИКАЦИИ SAE PUBLICATION — выпущены SAE, 400 Commonwealth Drive, Уоррендейл, Пенсильвания, 15096-0001.

SAE JA1011 — «Критерии оценки для процессов технического обслуживания для обеспечения надежности (RCM)»

2.2 Публикации по теме — Ссылки на следующие публикации приведены только в информационных целях и не являются обязательной составляющей настоящего Технического отчета SAE.

2.2.1 U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE PUBLICATION — Available from NTIS, Port Royal Road, Springfield, VA 22161.

Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, «Reliability-Centered Maintenance,» Department of Defense, Washington, D.C. 1978, Report Number AD-A066579

2.2.2 U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE PUBLICATIONS — Available from DODSSP, Subscription Services Desk, Building 4/Section D, 700 Robbins Avenue, Philadelphia, PA 19111-5098.

MIL-HDBK 2173(AS) — «Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment» (Командование авиационных систем ВМС США) (ПРИМЕЧАНИЕ: документ аннулирован без замены в августе 2001 г.)

NAVAIR 00-25-403 — «Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process» (Командование авиационных систем ВМС США)

MIL-P-24534 — «Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation» (Командование кораблестроения и вооружений США)

2.2.3 INDUSTRIAL PRESS PUBLICATION—Available from Industrial Press, Inc., 200 Madison Avenue, New York City, New York, 10016 (also available from Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, Great Britain OX2 8DP).

Moubray, John, «Reliability-centered Maintenance», 1997

2.2.4 U.K. MINISTRY OF DEFENCE PUBLICATION — Available from Reliability-centred Maintenance Implementation Team, Ships Support Agency, Ministry of Defence (Navy), Room 22, Block K, Foxhill, Bath, BA1 5AB, United Kingdom

NES 45 «Naval Engineering Standard 45, Requirements for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels» (ограничено для коммерческого использования)

2.3 **Прочие публикации** — К следующим публикациям авторы Технического отчета SAE обращались в процессе подготовки документа, однако эти публикации не являются его обязательной частью.

Anderson, Ronald T. and Neri, Lewis, «Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods», Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

Andrews, J.D. and Moss, T.R., «Reliability and Risk Assessment», Longman, Harlow, Essex (UK), 1993.

Blanchard, B.S., D. Verma and Peterson, E.L., «Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management», John Wiley and Sons, New York, 1995.

Cox, S.J. and Tait, N.R.S., «Reliability, Safety and Risk Management», Butterworth Heinemann, Oxford, 1991.

«Dependability Management — Part 3-11: Application guide — Reliability centred maintenance», International Electrotechnical Commission, Geneva, Doc. No. 56/651/FDIS.

Jones, Richard B., «Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach», Gulf Publishing Co., Houston, TX, 1995.

MSG-3, «Maintenance Program Development Document», Air Transport Association, Washington, D.C. Revision 2, 1993.

«Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis», Department of Defense, Washington, D.C. Military Standard MIL-STD-1629A, Notice 2, 1984.

«Reliability Centered Maintenance for Aircraft, Engines and Equipment», United States Air Force, MIL-STD-1843. (ПРИМЕЧАНИЕ: документ аннулирован без замены в августе 1995 г.)

Smith, Anthony M., «Reliability Centered Maintenance», McGraw-Hill, New York, 1993.

Zwengelstein, G., «Reliability Centered Maintenance, a practical guide for implementation», Hermes, Paris, 1996.

3. **Определения**

3.1 **Старение** — мера подверженности стрессу, рассчитанная с момента ввода нового компонента в эксплуатацию или повторного ввода в эксплуатацию после восстановления его первоначальной мощности, которая может измеряться в календарном времени, продолжительности эксплуатации, пройденном расстоянии, относительной длительности включения или единицах вывода или производительности.

3.2 **Соответствующая задача** — задача, которая является технически исполнимой и оправданной (т.е. применимой и эффективной).

3.3 **Условная вероятность отказа** — вероятность того, что за определенный период времени произойдет отказ, при условии что соответствующий компонент действует на начало этого периода.

3.4 **Требуемая производительность** — уровень производительности, запрашиваемый владельцем или пользователем ресурса или системы.

3.5 **Экологические последствия** — режим отказа или множественный отказ имеет экологические последствия, если приводит к нарушению корпоративных, муниципальных, региональных, национальных или международных экологических стандартов или норм, применимых к соответствующему ресурсу или системе.

3.6 **Явный отказ** — режим отказа, последствия которого становятся очевидны для технического персонала при стандартных рабочих условиях, если режим отказа возникает независимо от их действий.

3.7 **Явная функция** — функция, независимый отказ которой становится очевиден для технического персонала при стандартных рабочих условиях.

- 3.8 Последствия отказа** — влияние режима отказа или множественного отказа (результата отказа, влияния на безопасность, окружающую среду, эксплуатационные возможности, прямые и косвенные затраты на ремонт).
- 3.9 Результат отказа** — то, что происходит при возникновении режима отказа.
- 3.10 Задача поиска отказов** — запланированная задача, позволяющая выявлять специфические скрытые отказы.
- 3.11 Политика управления отказами** — общий термин, заключающий в себе задачи по состоянию, запланированное восстановление, запланированное списание, поиск отказов, эксплуатацию до отказа и единовременные изменения.
- 3.12 Режим отказа** — отдельное событие, вызывающее функциональный отказ.
- 3.13 Функция** — действия, ожидаемые владельцем или пользователем от ресурса или системы.
- 3.14 Функциональный отказ** — состояние, в котором ресурс или система не может выполнять определенную функцию с требуемым уровнем производительности.
- 3.15 Скрытый отказ** — режим отказа, результаты которого не становятся очевидными для технического персонала в стандартных рабочих условиях, если режим отказа возникает независимо от их действий.
- 3.16 Скрытая функция** — функция, независимый отказ которой не становится очевиден для технического персонала при стандартных рабочих условиях.
- 3.17 Первоначальная мощность** — уровень производительности, обеспечиваемый ресурсом или системой в момент ввода в эксплуатацию.
- 3.18 Множественный отказ** — событие, возникающее в случае отказа защищенной функции в то время, когда защитное устройство или система находится в состоянии отказа.
- 3.19 Интервал нетто R-F** — минимальный вероятный временной интервал между обнаружением потенциального отказа и возникновением функционального отказа.
- 3.20 Неэксплуатационные последствия** — категория последствий отказа, не оказывающих неблагоприятного влияния на безопасность, окружающую среду или операции, но требующих ремонта или замены каких-либо компонентов, которые могут быть повреждены в результате отказа.
- 3.21 Задача по состоянию** — запланированная задача, используемая для обнаружения потенциального отказа.
- 3.22 Единовременное изменение** — любое действие, предпринимаемое для изменения физических настроек ресурса или системы (переработка или модификация), изменение метода, используемого оператором или специалистом по техническому обслуживанию для выполнения определенной задачи, изменение условий эксплуатации системы или возможностей оператора или специалиста по техническому обслуживанию (обучение).
- 3.23 Условия эксплуатации** — ожидаемые обстоятельства, в которых эксплуатируется ресурс или система.
- 3.24 Эксплуатационные последствия** — категория последствий отказа, оказывающих неблагоприятное влияние на эксплуатационные возможности ресурса или системы (выход, качество продукта, обслуживание клиентов, военный потенциал или эксплуатационные расходы, не входящие в стоимость ремонта).
- 3.25 Владелец** — лицо или организация, которые могут пострадать или быть привлечены к ответственности в результате последствий режима отказа в силу их владения ресурсом или системой.
- 3.26 Интервал R-F** — интервал между моментом времени, когда потенциальный отказ может быть выявлен, и моментом его перехода в функциональный отказ (также называется «период развития отказа» и «период реализации отказа»).

- 3.27 Потенциальный отказ** — выявляемое условие, указывающее на то, что функциональный отказ может произойти или процессы, приводящие к нему, уже запущены.
- 3.28 Проактивное обслуживание** — обслуживание, выполняемое до возникновения отказа в целях предотвращения перехода компонента в состояние отказа (запланированное восстановление, запланированное списание и обслуживание по состоянию).
- 3.29 Защитное устройство или защитная система** — устройство или система, которые должны предотвращать, исключать или минимизировать последствия отказов других систем.
- 3.30 Первичная функция** — функция, определяющая основные причины приобретения ресурса или системы владельцем или пользователем.
- 3.31 Эксплуатация до отказа** — политика управления отказом, допускающая возникновение определенного режима отказа без попыток предупредить или предотвратить его.
- 3.32 Последствия для безопасности** — режим отказа или множественный отказ имеет последствия для безопасности, если может привести к травмам или смерти человека.
- 3.33 Запланированный** — выполняемый с фиксированными, предварительно определенными интервалами, включая «непрерывный мониторинг» (при котором интервал фактически равен нулю).
- 3.34 Запланированное списание** — запланированная задача, подразумевающая списание элемента при достижении или до достижения определенного срока эксплуатации независимо от его текущего состояния.
- 3.35 Запланированное восстановление** — запланированная задача по восстановлению мощности элемента при достижении или до достижения определенного интервала (предельного срока эксплуатации) вне зависимости от его текущего состояния до уровня, обеспечивающего достаточную вероятность поддержания работоспособности до завершения следующего заданного интервала.
- 3.36 Вторичные функции** — функции, которые должен выполнять ресурс или система, помимо первичных функций, например для соответствия нормативным требованиям или решения задач в области защиты, контроля, сдерживания, обеспечения комфорта, поддержания внешнего вида, энергоэффективности и структурной целостности.
- 3.37 Пользователь** — лицо или организация, эксплуатирующее ресурс или систему, которые могут пострадать или быть привлечены к ответственности в результате последствий режима отказа системы.

4. Аббревиатуры

BITE встроенные средства контроля (Built-In Test Equipment)
FFI интервал поиска отказов (задачи) (Failure-finding interval)
FMEA анализ характера и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis)
mm миллиметры
MMF среднее время между множественными отказами (Mean Time Between Multiple Failures)
MTBF среднее время между отказами (Mean Time Between Failures)
MTED MTBF защищенной функции
MTIVE MTBF защитной функции
psi фунты на квадратный дюйм
RCM техническое обслуживание для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance)
RPM число оборотов в минуту (Revolutions Per Minute)
UTIVE допустимая недоступность защитной функции

- 5. Определение ресурса** — «RCM представляет собой специфический процесс, используемый для определения политик, которые должны быть реализованы для управления режимами отказа, способными привести к функциональному отказу любого ресурса в данных эксплуатационных условиях». SAE JA1011, раздел 1.1)

Чтобы определить соответствующие политики управления отказами для любого ресурса или системы, необходимо определить ресурс или систему. Эта задача включает в себя выбор ресурса/системы, определения их границ и наиболее соответствующего уровня подробных данных, на котором следует выполнять анализ.

В SAE JA1011 указаны процессы, используемые для выбора подходящих политик управления отказами при допущении, что соответствующие ресурс/система уже выбраны и определены. Однако в нем отсутствуют критерии процессов, используемых для выбора и определения собственно ресурсов или систем, поскольку такие процессы в значительной степени зависят от типа ресурса/системы, а также от того, где, в каких целях и кем они используются или должны использоваться. Однако ряд рекомендаций по данной теме содержится в Разделе 18 настоящего руководства.

6. Функции — процесс RCM, соответствующий стандарту SAE JA1011, начинается с вопроса: «Что является функциями и связанными с ними требуемыми стандартами производительности ресурса в текущих эксплуатационных условиях (функциях)?». В этом разделе рассматриваются следующие 4 ключевых понятия, имеющих отношение к функциям, перечисленным в Разделе 5.1 SAE JA1011:

- a. Эксплуатационные условия
- b. Первичные и вторичные функции
- c. Операторы функций
- d. Стандарты производительности

6.1 Эксплуатационные условия — «Необходимо определить эксплуатационные условия для ресурса». (SAE JA1011, раздел 5.1.1)

Функции, режимы отказов, последствия отказов и политики управления отказами, применяемые к любому ресурсу, будут зависеть не только от того, что представляет собой ресурс, но также и от точных условий его предполагаемого использования. Таким образом, для ответа на приведенный выше вопрос, необходимо точно определить эти условия.

Определение эксплуатационных условий для ресурса обычно включает в себя краткое общее описание использования, места использования, общие критерии производительности, например выход, производственную мощность, безопасность, экологическую сознательность и т.д. В определении эксплуатационных условий необходимо отразить следующие вопросы:

- a. Групповые и поточные процессы: эксплуатируется ли ресурс в рамках группового (периодического) или поточного (непрерывного) процесса.
- b. Стандарты качества: общие ожидания относительно качества или уровня обслуживания клиентов с точки зрения таких параметров, как общий процесс брака, показатели удовлетворенности клиентов (соответствие ожиданиям по текущей работоспособности в транспортных системах или доле гарантийных рекламаций по произведенной продукции) или боеготовность.
- c. Экологические стандарты: корпоративные, региональные, национальные и международные стандарты, применяемые к ресурсу (если таковые существуют).
- d. Стандарты безопасности: применение каких-либо требований безопасности (с точки зрения общих повреждений и/или уровня аварийности) к ресурсу.
- e. Операционное направление: характеристики расположения эксплуатируемого оборудования (северные или тропические районы, пустыня или джунгли, удаленность от побережья, близость к источникам запасных частей и/или трудовых ресурсов и т.д.).
- f. Интенсивность эксплуатации: в случае производства и ведения горных работ — используется ли оборудование, задействованное в процессе, в течение 24 часов в сутки 7 дней в неделю или с меньшей интенсивностью. В случае коммунальных служб — эксплуатируется ли оборудование с пиковой нагрузкой или в условиях стандартной нагрузки. В случае военного оборудования — разработаны ли политики управления отказами для мирного или военного времени.
- g. Избыточность: существует ли какая-либо избыточная или резервная мощность, и какую форму она имеет.
- h. Незавершенное производство: степень, до которой незавершенное производство (если оно имеется) допускает остановку оборудования без влияния на общий выход или производительность.
- i. Запасные части: были ли приняты какие-либо решения относительно хранения запасных частей, которые могут негативно повлиять на последующий выбор политик управления отказами.

- j. Рыночный спрос/поставки сырья: вероятно ли негативное влияние циклических колебаний спроса и/или поставок сырья на последующий выбор политик управления отказами. (Такие колебания возможны в течение дня в случае городского транспорта или в течение года для электрической станции, парка развлечений или пищевого предприятия.)

В случае очень больших или комплексных систем может оказаться необходимым структурирование эксплуатационных условий в виде иерархии; при необходимости следует первоначально указать формулировку миссии всей организации, использующей ресурс.

6.2 Список функций — «Необходимо определить все функции ресурса/системы (все первичные и вторичные функции, включая функции защитных устройств)». (SAE JA1011, раздел 5.2.1)

Целью процесса RCM является разработка набора правил, обеспечивающих соответствие функций ресурса или системы стандартам производительности, приемлемых для владельца/пользователя. Таким образом, процесс RCM начинается с идентификации всех функций ресурса в эксплуатационных условиях.

Функции можно разделить на две категории: первичные и вторичные.

6.2.1 ПЕРВИЧНЫЕ ФУНКЦИИ — ресурсы или системы приобретаются организациями для выполнения определенной функции или нескольких функций. Такие функции являются первичными функциями ресурса. Например, основной причиной для покупки автомобиля может стать «транспортировка до 5 пассажиров со скоростью до 90 км/ч на соответствующих дорогах».

6.2.2 ВТОРИЧНЫЕ ФУНКЦИИ — большинство ресурсов, помимо первичных функций, также выполняет другие функции. Они называются вторичными функциями. Обычно вторичные функции менее очевидны, чем первичные. Однако отсутствие вторичной функции может иметь серьезные последствия, иногда даже более серьезные, чем для первичной. Таким образом, вторичные функции часто требуют столько же, если не больше внимания, чем первичные функции, поэтому они должны быть четко определены.

При определении вторичных функций необходимо учитывать следующее:

- a. Экологическую сознательность
- b. Безопасность/структурную целостность
- c. Управление/сдерживание/удобство
- d. Внешний вид
- e. Защитные устройства и системы
- f. Экономия/эффективность
- g. Избыточность

Эти вопросы далее рассмотрены более подробно.

6.2.2.1 Экологическая сознательность — эти функции определяют степень, до которой ресурс должен соответствовать корпоративным, муниципальным, региональным, национальным и международным экологическим стандартам и нормам, применимым для данного ресурса. Такие стандарты, например, регулируют распространение опасных материалов в окружающей среде и уровень шума.

6.2.2.2 Безопасность — иногда необходимо составлять определения функций, учитывающих определенные угрозы безопасности, присущие схеме или реализации процесса (в противоположность угрозам безопасности, являющимся результатом функционального отказа). Например, функция электрической изоляции бытовых электроприборов позволяет «избежать прикосновений пользователей к функционирующим электрическим компонентам».

- 6.2.2.3 *Структурная целостность* — многие ресурсы имеют вторичную функцию поддержки или безопасной установки на другом компоненте. Например, если первичной функцией стены может являться защита людей и оборудования от погодных условий, она также должна поддерживать крышу и служить для размещения полок и картин.
- 6.2.2.4 *Управление* — во многих случаях пользователи не только хотят, чтобы ресурсы выполняли функции в соответствии с определенным стандартом производительности, но и рассчитывают на возможность самостоятельного управления производительностью. Такие ожидания формализуются в отдельных определениях функций. Например, функция охлаждающей системы может заключаться в регулировке температуры по желанию пользователя (выбор между двумя определенными температурами). Индикация и обратная связь создают важный набор функций управления.
- 6.2.2.5 *Сдерживание* — системы, первичная функция которых заключается в хранении материалов, также должны их содержать. Аналогичным образом, системы используемые для перемещения материалов, особенно жидкостей, также имеют функцию сдерживания. Такие функции также должны быть определены.
- 6.2.2.6 *Удобство* — владельцы и пользователи обычно ожидают, что их ресурсы или системы не вызывают проблем или беспокойства у операторов и технических специалистов. Несомненно, такие проблемы следует решать на этапе проектирования. Однако износ или изменение ожиданий все же могут привести к их возникновению. Наилучший способ предотвратить проблемы — обеспечить точное описание соответствующих определений функций и их полное соответствие текущим стандартам.
- 6.2.2.7 *Внешний вид* — внешний вид часто является важной вспомогательной функцией. Например, первичной причиной для покраски большей части промышленного оборудования является защита от коррозии. Однако яркий цвет может быть выбран для улучшения видимости в целях безопасности, и эта функция также должна быть задокументирована.
- 6.2.2.8 *Защита* — защитные функции позволяют избегать, исключать или минимизировать последствия отказа других функций. Эти функции связаны с приборами и системами, которые:
- Предупреждают операторов об аномальных условиях (предупреждающие лампы или сигналы).
 - Останавливают работу оборудования в случае функционального отказа (механизмы выключения).
 - Исключают или устраняют аномальные условия, вызванные функциональным отказом (предохранительные устройства, системы пожаротушения, плавсредства).
 - Выполняют отказавшую функцию (резервные структурные компоненты, аварийные установки).
 - Предотвращают возникновение опасных ситуаций (предупреждающие знаки, защитные покрытия).
- Защитная функция обеспечивает, что отказ защищенной функции будет менее серьезным, нежели без защиты. Соответствующие устройства встроены в системы для снижения рисков, поэтому их функции необходимо задокументировать особенно внимательно.
- 6.2.2.9 *Экономия/эффективность* — в большинстве организаций общие ожидаемые затраты составляют расходную часть бюджета. Однако для определенных ресурсов ожидаемые затраты можно рассчитывать напрямую с использованием определений вторичных функций, определяющих, например, уровни потребления энергии и степень износа обрабатываемых материалов.
- 6.2.2.10 *Избыточные функции* — некоторые системы содержат компоненты, которые в действительности полностью избыточны. Обычно это происходит, когда оборудование или область его применения в течение нескольких лет были оптимизированы или было определено новое оборудование. Хотя такие элементы не имеют определенной функции и часто их удаление приводит к дополнительным затратам, они вызывают отказы и таким образом влияют на общую надежность системы. Чтобы избежать отказов, необходимо обеспечить их обслуживание, что, соответственно, приводит к повышенному потреблению ресурсов. При их удалении также удаляются соответствующие режимы отказов и исключаются затраты. Однако, для удаления таких элементов необходимо убедиться в том, что их функции определены и понятны.

6.2.2.11 *Функции «надежности»* — зачастую в качестве функций указываются, например, такие: «функционирование 7 дней в неделю и 24 часа в день». Но в действительности надежность сама по себе не является функцией. Ожидания определенного уровня производительности замещают все прочие функции. Цели с точки зрения надежности/доступности могут быть задокументированы в определении эксплуатационных условий. Надежность определенного ресурса фактически определяется надлежащими действиями в случае каждого из режимов отказов, которые могут вызвать полный отказ функции.

6.3 Описание функций — «Все определения функций должны содержать действие, объект и стандарт производительности (в количественном выражении во всех случаях, когда это возможно)». (SAE JA1011, раздел 5.3.1)

Например, на Рис. 1 показан насос, перекачивающий воду из одного резервуара в другой. Номинальная мощность насоса составляет 1000 литров в минуту, но вода выкачивается из резервуара с максимальной скоростью 800 литров в минуту. Первичную функцию этого насоса можно описать следующим образом: «перекачивание воды из резервуара X в резервуар Y со скоростью не менее 800 л/мин». В данном случае определены действие — «перекачивание», объект — «вода» и стандарт производительности «из резервуара X в резервуар Y со скоростью не менее 800 л/мин».

Определения защитных функций требуют особого внимания. Такие функции применяются в исключительных случаях, т.е. при внештатных ситуациях, и это должно быть отражено в определении. Обычно для этого используются союзы «если» или «в случае», за которыми следует краткое описание обстоятельств или события, которые приводят к активации защитной функции. Например, функцию предохранительного клапана давления можно описать следующим образом: «способность уменьшения давления в котле, если оно превышает 250 фунтов/кв. дюйм».



РИС. 1 ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НАСОСА

6.4 **Стандарты производительности** — «стандарты производительности, заданные в определениях функций, должны соответствовать уровню производительности, требуемому владельцу или пользователю ресурса/системы в соответствующих эксплуатационных условиях». (SAE JA1011, раздел 5.4.1)

Любая организованная система в условиях реального мира постепенно разрушается до полной деорганизации («хаоса» или «энтропии»), если не предприняты меры, препятствующие процессам, которые способствуют такому разрушению.

Например, центробежные насосы часто подвержены износу рабочего колеса. Это происходит в зависимости от того, перекачивает ли насос кислоту или масло, а также от материала, из которого изготовлено колесо: титана или мягкой стали. Однако наиболее важный вопрос заключается в том, насколько быстро рабочее колесо изнашивается до той степени, когда перекачивание жидкости с минимальной допустимой скоростью станет невозможным.

Когда производительность ресурса опускается ниже минимума, который допускается пользователем, регистрируется отказ ресурса. И наоборот, если производительность ресурса удается поддерживать на уровне выше минимального, он продолжает функционировать. В данном Руководстве понятие «пользователи» включает в себя владельцев ресурсов, собственно пользователей ресурсов (как правило, операторов) и общество в целом. Владельцы будут удовлетворены в том случае, если ресурсы обеспечивают удовлетворительные показатели окупаемости инвестиций (обычно финансовой отдачи от коммерческих операций или других показателей), позволяющих оценивать некоммерческое использование). Пользователи будут удовлетворены в том случае, если каждый ресурс продолжает выполнять требуемые функции в соответствии с тем стандартом производительности, который они считают

удовлетворительным. Наконец, общество в целом будет удовлетворено в том случае, если ресурсы работают безотказно и не угрожают общественной безопасности и окружающей среде.

В сущности, это означает, что при необходимости поддержания работы ресурса на уровне, удовлетворительном для пользователя, целью обслуживания является обеспечение выполнения ресурсом минимальных требований к производительности, допустимых для пользователей. Если бы существовала возможность создания ресурса, работающего на минимальном уровне производительности без какого-либо ухудшения производительности, такой ресурс мог бы использоваться непрерывно и не требовал бы обслуживания.

Однако постепенное разрушение ресурсов неизбежно, и этот процесс следует учитывать. Это означает, что при вводе в эксплуатацию ресурс должен обеспечивать уровень производительности, выше минимального, который ожидает пользователь. Тот уровень, который демонстрирует ресурс в этот момент времени, называется его первоначальной мощностью. На Рис. 2 показана верная взаимосвязь между мощностью и требуемым уровнем производительности.

Это означает, что производительность можно определить двумя способами:

- a. Желаемая производительность (требования, предъявляемые пользователем к ресурсу)
- b. Имеющаяся мощность (возможности ресурса)



РИС. 2 СОЗДАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ УХУДШЕНИЯ

Предел ухудшения может быть достаточно большим, чтобы до функционального отказа компонента прошло длительное время, но недостаточно большим, чтобы у системы был повышенный запас прочности, что требует значительных затрат. На практике этот предел адекватен для большинства компонентов, поэтому для них возможно разработать соответствующие программы обслуживания.

Однако, если требуемая производительность выше, чем первоначальная мощность, обслуживание никогда не позволит достичь требуемой производительности, т.е. оно нецелесообразно.

Это означает, что для определения возможности обслуживания ресурса необходимо знать оба вида производительности: первоначальную мощность ресурса и минимальную производительность, приемлемую для пользователя в данных условиях применения ресурса. Минимальный уровень производительности — это тот стандарт, который должен быть указан в определении функции.

Например, первоначальная мощность насоса на Рис. 1 составляет 1000 л/мин, а скорость, с которой вода выкачивается из резервуара (выбор), составляет 800 л/мин. В таком случае насос соответствует требованиям пользователей, пока он перекачивает воду быстрее, чем она выбирается из резервуара. Таким образом, первичная функция насоса определяется как «перекачивание воды из резервуара X в резервуар Y со скоростью не менее 800 л/мин», а не «перекачивание со скоростью 1000 л/мин».

Обратите внимание на то, что в случае использования такого же насоса в условиях, когда выбор воды из резервуара составляет, скажем, 900 л/мин, первичная функция определялась бы как «перекачивание воды из резервуара X в резервуар Y со скоростью не менее 900 л/мин», и программа обслуживания была бы скорректирована в соответствии с новыми требованиями к производительности.

Пользователи и технические специалисты часто имеют противоположные мнения о допустимом уровне производительности. Поэтому во избежание противоречий на предмет того, что следует считать «функциональным отказом», они должны согласовать между собой и принять минимальные стандарты допустимой производительности и привлечь к этому процессу все стороны, имеющие законный интерес к эксплуатации ресурса.

Стандарты производительности по возможности должны иметь количественную оценку, поскольку такие стандарты определяются более четко и точно, чем качественные. В некоторых случаях можно использовать только количественные стандарты: например, при работе с функциями, связанными с внешним видом. В таких случаях необходимо принять все возможные меры к тому, чтобы качественный стандарт правильно оценивался и принимался пользователями и специалистами по обслуживанию ресурса.

7. **Функциональные отказы** — процесс RCM, соответствующий стандарту SAE JA1011, должен удовлетворительно отвечать на вопрос: «Какие отказы допустимы для продолжения выполнения ресурсом своих функций (функциональные отказы)?». В разделе 5.2 стандарта SAE JA1011 говорится о том, что «должны быть выявлены все состояния отказа, связанные с каждой функцией».

В разделе 6 было упомянуто о том, что отказ ресурса возникает как следствие невозможности выполнения ожидаемых пользователями действий. Также в нем было определено, что действия, которые должен выполнять ресурс, являются его функцией и каждый ресурс имеет по крайней мере одну (и часто несколько) различных функций. Поскольку возможен отказ любой из функций, то любой ресурс может быть подвержен целому ряду состояний отказов.

Например, первичная функция насоса на Рис. 1 была определена как «перекачивание воды из резервуара X в резервуар Y со скоростью не менее 800 л/мин», а его вторичная функция — как «поддержание наличия воды в насосе». Такой насос может обеспечить перекачивание требуемого объема воды (без отказа первичной функции) со значительной утечкой (отказ вторичной функции). И наоборот, производительность насоса может снизиться до той точки, в которой он не сможет перекачивать требуемый объем воды (отказ с точки зрения первичной функции), но будет содержать в себе требуемое количество жидкости (без отказа вторичной функции).

По этой причине более рационально определять отказ конкретных функций, но не отказ ресурса в целом. В предыдущем примере также показано, почему в процессе RCM для описания состояний отказа применяется термин «функциональный отказ», а не просто «отказ». (Обратите внимание на то, что в RCM различаются функциональный отказ, состояние отказа и режим отказа, т.е. событие, вызывающее состояние отказа.)

При определении функциональных отказов необходимо различать частичный и полный отказ, а также верхний и нижний пределы.

- 7.1 **Частичный и полный отказ** — функциональные отказы, приводящие к полному отказу функции, достаточно просто выявить. Например, очевидно, что насос, описанный в п. 6.3, подвержен функциональному отказу, если он не перекачивает воду («полный отказ»). Однако функциональный отказ также происходит, если насос может перекачивать воду, но скорость перекачивания менее 800 л/мин.

Второе состояние отказа в данном примере считается частичным отказом. Частичные отказы должны быть определены отдельно, поскольку они почти всегда вызваны различными режимами отказа в результате полных отказов, а также поскольку их последствия почти всегда различны.

Следует помнить, что частичный отказ не является снижением уровня производительности ниже первоначального уровня. Это происходит с любым ресурсом с течением времени, и такое ухудшение производительности является допустимым, пока не достигает уровня, неприемлемого для пользователя ресурса (см. Рис. 2). Ухудшение становится функциональным отказом (частичным или полным), когда производительность опускается ниже минимального уровня, определенного пользователем.

7.2 Верхние и нижние пределы — стандарты производительности для некоторых функций включают в себя верхние и нижние пределы. Эти пределы сигнализируют об отказе оборудования, если его производительность падает ниже установленного значения или превышает его. В этих случаях превышение верхнего предела должно документироваться отдельно от падения ниже нижнего предела. Это связано с тем, что отказы и/или последствия, связанные с превышением верхнего предела, обычно отличаются от последствий падения ниже нижнего предела.

Например, основная функция шлифовальной машины может быть указана следующим образом: “Шлифовка опор подшипников с циклом 3,00 минуты \pm 0,03 минуты до диаметра 75 мм \pm 0,1 мм и качеством обработки поверхности не более Ra 0,2.” Оборудование считается отказавшим в следующих условиях:

- a. Оно прекращает работать
- b. Оно шлифует объект на протяжении более 3,03 минут
- c. Оно шлифует объект на протяжении менее 2,97 минут
- d. Диаметр превышает 75,1 мм
- e. Диаметр меньше 74,9 мм
- f. Недостаточное качество обработки поверхности (более Ra 0,2)

8. Режимы отказа — процесс RCM, соответствующий SAE JA1011, при этом ставит вопрос “Что вызывает данную функциональную неполадку (отказ)?” В этом разделе рассматриваются 5 ключевых понятий, имеющих отношение к отказам, перечисленным в разделе 5.1 SAE JA1011:

- a. Определение режимов отказа
- b. Значение определения «с разумной степенью вероятности»
- c. Уровни обусловленности
- d. Источники информации
- e. Типы режимов отказа

8.1 Определение режимов отказа — “Необходимо определить все режимы отказа, которые с разумной степенью вероятности вызывают каждую из неполадок”. (SAE JA1011, раздел 5.3.1)

В разделе 7 настоящего руководства упоминается, что RCM различает состояние отказа оборудования (функциональную неполадку) и события, вызывающие состояния отказа (режимы отказа). Так как определение причин отказа невозможно до момента определения понятия “отказ”, процесс RCM определяет функциональные отказы до режимов отказа. Форма документирования этого представлена на рис. 3 для основной функции насоса с рис. 1. На рис. 3 представлены функции оборудования, функциональные неполадки и режимы отказа: практически все элементы анализа характера и последствий отказа (FMEA). “Последствия” всех режимов отказа представлены на следующем шаге (см. раздел 9 настоящего руководства).

На рис. 3 также показано, что описание режима отказа должно как минимум содержать существительное и глагол. Описание должно быть достаточно подробным, чтобы выбрать на его основе правильную политику управления отказами, но не быть избыточным, так как это заставляет тратить много времени на процесс анализа.

В частности, глаголы, используемые для описания режимов отказа, должны выбираться взвешенно, так как они существенным образом влияют на последующий процесс выбора политики управления отказами. Например, глаголы вида “отказывает”, “ломается” или “работает некорректно” не должны использоваться слишком часто, так как они практически не предоставляют информации о способе работы с отказом. Использование более конкретных глаголов позволяет выбирать один из многих вариантов управления отказами.

Например, режим отказа 1A4 на рисунке 3 может быть описан как “отказ соединения”. При этом такая фраза не предоставляет никаких подсказок по профилактике или предотвращению этого режима отказа. Если написать “болтовое соединение раскручивается” или “ступица срезается в связи с усталостью материала”, то такое описание облегчает определение возможных профилактических мероприятий.

| ОБОРУДОВАНИЕ: Насосная система | | | | | |
|--------------------------------|---|--|------------------------------------|----------------------------------|---|
| ФУНКЦИЯ | | ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОТКАЗ (потеря работоспособности) | | РЕЖИМ ОТКАЗА (причина отказа) | |
| 1 | Перенос воды из резервуара X в резервуар Y со скоростью не менее 800 л/мин. | A | Полная невозможность передачи воды | 1 | Заедание подшипника |
| | | | | 2 | Возгорание двигателя |
| | | | | 3 | Отсоединение колеса |
| | | | | 4 | Срезание ступицы из-за усталости материала |
| | | | | 5 | Заедание впускного клапана в закрытом состоянии |
| | | | | 6 | Блокирование колеса инородным телом и т.д. |
| | | B | Перенос менее 800 л/мин. | 1 | Привод колеса |
| | | | | 2 | Частичная блокировка всасывающей линии |

РИС. 3 РЕЖИМЫ ОТКАЗА НАСОСА

Описание для клапанов, переключателей и подобных устройств должно включать в себя указание на положение, заедание в котором вызывает потерю работоспособности. Описание “Заедание впускного клапана в закрытом состоянии” содержит больше информации чем “Заедание впускного клапана”. Кроме того, следует помнить, что целью определения режимов отказа является определение причины функциональной неполадки, позволяющее предотвратить ее. Таким образом, может потребоваться выполнить еще один шаг: “Заедание впускного клапана в закрытом состоянии в связи с возникновением ржавчины на направляющем винте”. В этом случае использование слова “ржавчина” указывает на то, что усилия по управлению неполадками следует сконцентрировать на обнаружении или контроле ржавчины.

8.2 Значение определения «с разумной степенью вероятности» — “метод, используемый для определения режима отказа, способного возникнуть с разумной степенью вероятности и приемлемого для владельца или пользователя оборудования». (SAE JA1011, раздел 5.3.2)

В разделе 8.1 указывается, что необходимо определить все режимы отказа, которые с разумной степенью вероятности вызывают каждую из неполадок. «Разумная степень вероятности» обозначает вероятность возникновения неполадки, отвечающую критериям разумности, при использовании оборудования квалифицированными сотрудниками. Вместо термина «разумная степень вероятности» также используется термин «вероятный». Если сотрудники, обученные использованию RCM и имеющие сведения о данном оборудовании в контексте его работы, соглашались с тем, что вероятность возникновения конкретного режима отказа достаточно высока для целесообразности дальнейшего анализа, то этот режим отказа должен быть указан в списке.

На практике вопрос о необходимости включения режима отказа в список может быть крайне сложным. Он связан с вероятностью возникновения и уровнем подробностей в описании режимов. Небольшое количество режимов отказа и/или небольшое количество подробностей делает анализ поверхностным и даже опасным. Избыточное количество режимов отказа и/или подробностей приводит к тому, что процесс RCM занимает слишком много времени. В крайних случаях такой процесс может занимать в два или даже в три раза большее время чем необходимо (т.н. «аналитический паралич»), а также приводить к созданию чрезмерно сложных программ обслуживания.

При возникновении сомнений или разногласий в ходе определения порога “разумности” окончательное решение должно приниматься организацией, которая владеет оборудованием или использует его, так как именно она будет отвечать за последствия возникновения режимов отказа.

Обратите внимание на то, что решение о включении режима отказа в список должно приниматься исходя из последствий этого отказа. Если последствия действительно крайне серьезны, то в список необходимо включать менее вероятные режимы отказа и подвергать их дальнейшему анализу.

Например, если насос, описанный на рис. 3, установлен на производстве продуктов питания или автосборочном заводе, то режим отказа «разрушение корпуса объектом, упавшим с неба» сразу же будет отклонен из-за его смехотворно малой вероятности. Если же тот же насос является основным насосом контура охлаждения ядерного реактора на АЭС, то этот режим отказа необходимо рассмотреть всерьез даже несмотря на то, что он крайне маловероятен. Соответствующей политикой управления для данной неполадки может быть запрет полетов самолетов над электростанцией или сооружение крыши, способной выдержать падение самолета. Конечно, это не придуманный пример: обе политики по умолчанию применяются на АЭС.

8.3 Уровни обусловленности — «Режимы отказа должны определяться на уровне обусловленности, который позволяет определить соответствующую политику управления неполадками». (SAE JA1011, раздел 5.3.3)

В предыдущих разделах этого руководства указывалось, что описание режимов отказа должно быть достаточно подробным, чтобы выбрать на его основе правильную политику управления отказами, но не быть избыточным, так как это заставляет тратить много времени на процесс анализа.

Степень подробности описания режимов отказа демонстрируется на рис. 4 для насоса, функции и функциональные отказы которого описаны на рис. 3. Рисунок 4 содержит некоторые режимы отказа, которые могут вызвать функциональный отказ «Полная невозможность передачи воды». В этом примере режимы отказа рассматриваются на семи уровнях подробностей, начиная с отказа всего насоса.

Первым следствием для данного примера является связь уровня подробностей и количества режимов отказа, включенных в список. Чем глубже мы «погружаемся» в анализ FMEA, тем большее количество режимов отказа можно включить в список. Например, на уровне 3 рисунка 4 представлено 3 режима отказа, а на уровне 6 — 20 режимов.

Другим следствием является понятие «основной причины». Оно описано ниже.

8.3.1 ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ — это понятие часто используется в связи с анализом отказов. Оно подразумевает возможность достижения конечного и абсолютного уровня обусловленности при должной развертке. В действительности это не только крайне сложно, но и обычно не требуется.

Например, на рисунке 4 режим отказа «Отсоединение гайки колеса» приведен на уровне 3 и вызван режимом «Трещина гайки колеса» на уровне 4. На более глубоком уровне этот отказ может быть вызван перезатяжкой гайки (уровень 5), что может быть вызвано ошибкой сборки (уровень 6). Ошибка сборки может быть вызвана тем, что сборщик отвлекся (уровень 7). Это может быть связано с тем, что его ребенок болеет (уровень 8), а этот режим отказа мог быть вызван тем, что в ресторане ребенок съел испорченную еду (уровень 9).

Очевидно, что процесс рассмотрения может продолжаться практически бесконечно и выходить за рамки сферы ответственности организации, которая обеспечивает только функционирование и обслуживание оборудования. Именно поэтому SAE JA1011 требует от процесса RCM определять режимы отказа на уровне обусловленности, который позволяет определить подходящую политику управления отказами. Этот уровень будет разным для различных режимов отказа. Некоторые режимы могут быть определены на уровне 3, некоторые — на уровне 5, а остальные — на других уровнях.

| Уровень 1 | Уровень 2 | Уровень 3 | Уровень 4 | Уровень 5 | Уровень 6 | Уровень 7 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------------|
| Отказ всего насоса | Отказ насоса | Отказ колеса | Отсоединение колеса | Ослабление гайки крепления | Неверная затяжка гайки | Ошибка сборки |
| | | | Износ гайки крепления | Коррозия и разрушение гайки | Неверный материал гайки | Указан неверный материал |
| | | | Трещина гайки колеса | Перезатяжка гайки колеса | Поставлен неверный материал | Поставлен неверный материал |
| | | | Срезан крепеж колеса | Неверный материал гайки | Указан неверный материал | Поставлен неверный материал |
| | | | | Указана неверная сталь для крепежа | Ошибка проектирования | Ошибка сборки |
| | | | | Поставлена неверная сталь для крепежа | Ошибка закупки | Ошибка сборки |
| | | | | | Ошибка складского хранения | Ошибка заявки |
| | | | Разрушение колеса инородным объектом | Деталь в системе после обслуживания | Ошибка сборки | См. "человеческий фактор" |
| | | | Инородное тело в системе | Отверстия в фильтре, вызванные коррозией | Не установлен сетчатый фильтр | Ошибка сборки |
| | | | Отверстия в корпусе болта | Недостаточная затяжка болтов корпуса | Ошибка сборки | См. "человеческий фактор" |
| | | | Ослабление болтов из-за вибрации | Коррозия и разрушение болтов корпуса | | |
| | | | Отказ соединения корпуса | Неверный подбор соединений | Ошибка сборки | См. "человеческий фактор" |
| | | | Повреждение корпуса | Отказ соединений из-за истирания | Ошибка эксплуатации | См. "человеческий фактор" |
| | | | | Повреждение корпуса транспортным средством | Повреждение корпуса метеоритом | |
| | | | | Повреждение объектом, упавшим с неба | Повреждение корпуса частью самолета | |
| | | | Отказ уплотнителей насоса | Стандартный износ | Износ уплотнителя трением | |
| | | | Работа насоса всухую | См. ниже "Прекращение поступления воды" | | |
| | | | Неверное расположение уплотнителя | Ошибка сборки | См. "человеческий фактор" | |
| | | | Загрязнение уплотнителя | Ошибка сборки | См. "человеческий фактор" | |
| | | | Установлен неверный уплотнитель | Поставлен неверный уплотнитель | Ошибка закупки | См. "человеческий фактор" |
| | | | | | Ошибка складского хранения | См. "человеческий фактор" |
| | | | | Указан неверный уплотнитель | Ошибка проектирования | См. "человеческий фактор" |
| | | | | Повреждение уплотнителя при падении на складе | Ошибка складского хранения | См. "человеческий фактор" |
| | | | | Повреждение уплотнителя при транспортировке | Ошибка закупки | См. "человеческий фактор" |
| Отказ двигателя | | И т.д. | | | | |
| Отказ привода | | И т.д. | | | | |
| Закрыт клапан | | И т.д. | | | | |
| Прекращение питания | | И т.д. | | | | |

РИС. 4 РЕЖИМЫ ОТКАЗА С РАЗЛИЧНЫМИ УРОВНЯМИ ПОДРОБНЫХ ДАННЫХ

Обратите внимание на то, что некоторые представленные на рис. 4 режимы отказа не могут считаться достаточно вероятными в контексте, отличном от контекста рисунка 4. В таком случае будут отсутствовать причины для внесения их в список, хотя в него могут быть добавлены другие режимы ошибок, не указанные на рис. 4, но имеющие достаточную вероятность. Также следует отметить, что режимы отказов, перечисленные на рис. 4, относятся только к функциональному отказу «Полная невозможность передачи воды». На этом рисунке не представлены режимы отказа, приводящие к другим отказам, например, к потере герметичности или защиты.

- 8.4 Источники информации о режимах отказов** — «Списки режимов отказов должны включать в себя режимы, возникавшие ранее, режимы, которые в настоящее время предотвращаются существующими программами обслуживания, и режимы, которые еще не возникали, но считаются достаточно вероятными в контексте конкретных операций». (SAEJA1011, 5.3.4)

Режимы отказа, возникавшие ранее на этом или подобном оборудовании, являются наиболее очевидными кандидатами на включение в этот список за исключением тех случаев, когда внесены изменения, предотвращающие подобный режим. Источниками информации о таких режимах отказа являются люди, хорошо знакомые с этим оборудованием (операторы, техники, поставщики или другие пользователи), записи технического обслуживания и базы данных.

Режимы отказов, которые предотвращаются существующими процедурами обслуживания, также должны включаться в список режимов. Чтобы убедиться в полноте списка, можно изучить существующие графики обслуживания идентичного или схожего оборудования и задать вопрос «Какой режим отказа возник бы в том случае, если это действие не было бы выполнено?» При этом проверка графиков обслуживания должна выполняться только после анализа RCM, что снижает вероятность постоянного тиражирования сложившейся ситуации.

Наконец, список режимов отказа должен содержать режимы, которые еще не возникали, но считаются достаточно вероятными в рассматриваемом контексте. Определение и выбор еще не возникших режимов отказа является необходимой особенностью профилактики отказов в целом и управления рисками в частности. Кроме того, это один из наиболее трудных аспектов анализа RCM, так как он требует принятия важных решений квалифицированными специалистами.

- 8.5 Типы режимов отказа** — «Списки режимов отказа должны включать в себя все события или процессы, которые могут вызывать функциональный отказ, в т.ч. ухудшение характеристик, дефекты конструкции и ошибки операторов или обслуживающего персонала (если человеческий фактор не исследуется отдельно от RCM в ходе особых аналитических процессов)». (SAE JA1011, 5.3.5)

Ухудшение характеристик происходит в том случае, если производительность оборудования до использования была выше требуемой, но упала ниже требуемой после ввода в эксплуатацию. В это понятие входят все формы износа, например усталость, коррозия, истирание, эрозия, испарение, ухудшение свойств (в особенности изоляции и смазки) и т.д. Эти режимы отказа безусловно следует включить в список режимов там, где они считаются достаточно вероятными, на наиболее подходящем уровне в соответствии с п. 8.3.

В некоторых случаях конструкция оборудования или конфигурация системы может сделать их неспособными к выполнению всего спектра функциональных требований в предполагаемом рабочем окружении. Если влияние таких дефектов на оборудование уже известно или, в случае с новым оборудованием, предполагается, что существующие процессы управления проектированием и производством не способны устранить такие дефекты, то эти режимы отказов необходимо включить в список, чтобы определить соответствующие политики управления впоследствии.

Многие функциональные отказы вызваны чрезмерной нагрузкой на оборудование, превышающей расчетные значения. На практике такая нагрузка часто применяется операторами. В профильной литературе такие отказы классифицируются различными способами. В практическом применении они обычно подпадают под одну из следующих категорий:

- a. Ошибки эксплуатации. Возможны две формы: Длительная и чаще всего намеренная перегрузка (например, эксплуатация машины на уровнях производительности, превышающих расчетные — эксплуатация автомобильного двигателя на избыточно высоких оборотах, вызывающая его преждевременный отказ). Внезапная и чаще всего случайная перегрузка (например, неправильное действие с оборудованием — включение задней передачи в автомобиле, двигающемся вперед, что приводит к поломке коробки передач).
- b. Неверная сборка (например, если механик оставляет инструмент в коробке передач или электрик неправильно соединяет выключатель).
- c. Внешнее повреждение (например, если корпус насоса разбивается вилочным погрузчиком). Если подобное увеличение нагрузки считается достаточно вероятным в рассматриваемом контексте и еще не рассматривалось в отдельном аналитическом процессе, то его также следует включить в список режимов отказа для выработки подходящих политик управления отказами.

9. Режимы отказа — процесс RCM, соответствующий SAE JA1011, при этом ставит вопрос “Что происходит при возникновении данной неполадки (влияние отказа)?” В этом разделе рассматриваются 2 ключевых понятия, имеющих отношение к отказам, перечисленным в разделе 5.4 SAE JA1011:

- a. Основные предположения
- b. Необходимая информация

9.1 Основные предположения — “Последствия отказов должны описывать то, что случится, если для профилактики, предотвращения или обнаружения отказа не будут приняты соответствующие меры” (SAE JA1011, раздел 5.4.1).

Утверждение о результатах отказа описывает последствия возникновения режима отказа. Обратите внимание на то, что RCM проводит четкое различие между последствиями отказа (что происходит) и результатами отказа (как и насколько важен режим отказа).

Как указано в разделе 10 настоящего руководства, утверждения о результатах отказа используются для оценки последствий режимов отказа. Они также содержат общие сведения, необходимые для выбора политики управления отказами, позволяющей избежать, устранить или свести к минимуму такие последствия в соответствии с потребностями пользователей или владельцев оборудования.

Основными вариантами политики управления отказами являются задачи по профилактическому обслуживанию (симптоматическое, регулярное восстановление или регулярная утилизация) с указанной периодичностью. Чтобы корректно определить эти задачи, при определении режимов отказов и связанных с ними результатов необходимо предположить, что профилактическое обслуживание не выполняется. Другими словами, чтобы начать «с нуля», необходимо предположить, что режим отказа действительно вызывает связанный с ним функциональный отказ. Режимы отказа необходимо описать и создать для них утверждения о результатах отказа.

9.2 Необходимая информация — “результаты отказа включают в себя все сведения, необходимые для оценки последствий отказа, например:

- a. признаки возникновения отказа при их наличии (для скрытых функций: что произошло бы в случае нескольких отказов);
- b. что должно произойти для причинения смерти или травм или для негативного воздействия на окружающую среду;
- c. что должно произойти для негативного воздействия на производство и операции;
- d. какой физический ущерб (при наличии) наносится этим отказом;
- e. что необходимо выполнить, чтобы восстановить работоспособность системы после отказа”. (SAE JA1011, раздел 5.4.2)

9.2.1 ПРИЗНАКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗА — утверждение о результатах отказа должно описывать возможные признаки самопроизвольного возникновения рассматриваемого отказа. Если они существуют, то необходимо описать вид этих признаков. Например, необходимо указать, меняется ли поведение оборудования в результате отказа существенным образом (предупредительные сигналы, изменение скорости или уровня шума и т.д.). Также необходимо описать, сопровождается ли предваряется ли режим отказа физическими проявлениями (громким звуком, огнем, дымом, паром, необычными запахами или вытеканием жидкости на пол).

При описании защиты необходимо кратко указать, что случится, если защищенная функция отказывает в тот момент, когда защита также не функционирует.

9.2.2 УГРОЗА БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ — если существует вероятность травм или смерти в результате режима отказа, а также нарушения стандартов безопасности окружающей среды, то в режиме отказа требуется описать, как это может случиться. Примеры записей списка:

- a. Повышенный риск пожара или взрыва
- b. Утечка опасных химикатов
- c. Поражение электрическим током
- d. ДТП или сход с рельсов
- e. Попадание грязи в продукты питания или лекарства
- f. Воздействие острых кромок или движущихся частей машин

При перечислении этих последствий не следует указывать, что режим отказа «имеет последствия для безопасности» или «влияет на окружающую среду». Необходимо просто перечислить последствия и оставить оценку для следующего этапа процесса RCM.

9.2.3 ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДСТВО И ОПЕРАЦИИ — описание результатов отказа должно содержать описание влияния на производство и операционную деятельность (при его наличии), а также длительность такого влияния. Необходимо учитывать следующие аспекты:

- a. Простой: сколько времени оборудование будет простаивать в связи с этим отказом от момента возникновения отказа до момента полного восстановления работоспособности. Чтобы обеспечить разумную и достаточную консервативность программы управления отказами, необходимо предположить, что режим отказа возникает в стандартной ситуации максимально неблагоприятного стечения обстоятельств (например, на производстве ночью или на мобильном оборудовании, которое находится дальше, чем обычно).
- b. Скорость работы: замедляется ли работа оборудования в результате режима отказа и насколько.
- c. Качество: влияет ли режим отказа на качество выполнения функции (например, точность систем контроля, параметры качества продукта или вопросы обслуживания клиентов (своевременная поставка и пр.)). Утверждение о результатах отказа также должно указывать на то, увеличивает ли режим отказа долю брака, вызывает ли аварийное прекращение выполнения задачи или выплату существенных штрафов, оговоренных в контракте.
- d. Прочие системы: вызывает ли режим отказа остановку и замедление другого оборудования и процессов или оказывает на них другое воздействие.
- e. Общие операционные затраты: вызывает ли режим отказа увеличение операционных затрат (например, повышенное энергопотребление или избыточное расходование материалов процесса).

9.2.4 ВТОРИЧНОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ — если рассматриваемый режим отказа вызывает существенные повреждения других компонентов или систем, следует также указать последствия такого вторичного повреждения.

9.2.5 НЕОБХОДИМЫЕ КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ — описание результатов отказа должно содержать краткое описание действий, подлежащих выполнению после возникновения режима отказа.

10. Категории последствий отказов

10.1 Категории последствий — “необходимо категоризовать последствия каждого режима отказа...” (SAE JA1011, раздел 5.5.1)

После того как все вероятные режимы отказа и их результаты были проанализированы с достаточным уровнем подробности, начинается следующий шаг процесса RCM, состоящий в оценке последствий каждого из режимов. Описание результатов отказа является основным источником информации, используемым для оценки последствий режимов отказа. Некоторые режимы отказа влияют на выходную продукцию, ее качество или обслуживание клиентов. Другие могут угрожать безопасности или окружающей среде. Некоторые повышают операционные затраты (например, при увеличении энергопотребления), а некоторые имеют последствия в нескольких или всех перечисленных областях. Существуют также режимы, которые не вызывают никаких последствий, если возникают отдельно, но могут способствовать возникновению более опасных отказов.

Если эти режимы отказа не предотвращаются, то время и объем работ, необходимых для их исправления, также влияет на организацию, так как их устранение отвлекает ресурсы, которые могли бы использоваться в другом месте.

Природа и серьезность этих эффектов определяет то, как каждый из режимов отказа рассматривается в организации. Их влияние (т.е. важность каждого режима) зависит от операционного контекста оборудования, стандартов производительности, применяемых к каждой функции, и физических последствий отказа.

Подобное сочетание контекста, стандартов и влияний означает, что с каждым режимом отказа связан определенный набор последствий. Если последствия серьезны, то для предотвращения режима отказа или для снижения и устранения последствий будут предприняты существенные усилия. Если же режим отказа имеет незначительные последствия, то профилактические действия могут не выполняться, а режим отказа просто будет устраняться при каждом возникновении.

Это означает, что последствия режимов отказа важнее их технических характеристик. Кроме того, это показывает, что управление отказами заключается не столько в предотвращении самих режимов отказов, а в избегании или уменьшении их последствий.

Далее в этом разделе рассматриваются критерии, используемые для оценки последствий режимов отказа и принятия решения о необходимой форме управления отказами. Все эти последствия разделены на четыре категории и два этапа. Первый этап позволяет отделить скрытые отказы от очевидных.

10.1.1 СКРЫТЫЕ И ОЧЕВИДНЫЕ ОТКАЗЫ — “процесс категоризации последствий должен отделять скрытые режимы отказа от очевидных”. (SAE JA1011, раздел 5.5.1.1)

Некоторые режимы отказа возникают таким образом, что никто не знает о том, что оборудование отказало, пока не произойдет другой отказ или нестандартное событие. Такие отказы называются скрытыми. Скрытый отказ — это режим отказа, результаты которого не становятся очевидными для технического персонала в стандартных рабочих условиях, если режим отказа возникает независимо от их действий. Напротив, очевидный отказ — это режим отказа, результаты которого становятся очевидными для технического персонала в стандартных рабочих условиях, если режим отказа возникает независимо от их действий.

Подход RCM к оценке последствий отказа начинается с разделения скрытых и очевидных отказов. Скрытые отказы могут составлять до половины всех режимов отказов в современном сложном оборудовании, поэтому их необходимо рассматривать с особым вниманием. Ниже демонстрируется связь скрытых дефектов и защиты, а также вводится понятие множественного отказа.

Скрытые отказы и защита: В разделе 6.2.2.8 настоящего руководства было упомянуто, что защита позволяет существенным образом смягчить последствия отказа защищенной функции по сравнению со случаем отсутствия защиты. Таким образом, любая защитная функция является по сути системой с двумя компонентами:

- a. Защитная функция
- b. Защищенная функция

Существование таких систем создает два набора возможных отказов в зависимости от того, является ли отказ защиты очевидным. Положения по каждому набору рассматриваются ниже, начиная с устройств, отказ которых очевиден.

10.1.1.1 Очевидный отказ защитных функций — в этом контексте “очевидный” отказ защитной функции представляет собой ситуацию, в которой последствия самого режима отказа станут очевидными персоналу в стандартной ситуации. Существование подобных режимов отказа создает три возможных сценария в любой момент времени.

Первая возможность: защитная и защищенная функция работают безотказно. В этом случае работа продолжается в штатном режиме.

Вторая возможность: защищенная функция отказывается раньше защиты. В этом случае защита выполняет свою задачу и в зависимости от своего вида снижает или устраняет последствия отказа защищенной функции.

Третья возможность: защитная функция отказывается раньше защищенной. Так как этот отказ очевиден, то потеря защиты станет явной. В этой ситуации вероятность отказа защищенной функции после отказа защитной функции может быть практически сведена к нулю путем отключения защищенной функции или предоставления альтернативной защиты до восстановления защитной функции (см. рис. 5). В свою очередь, это означает, что последствия очевидного отказа защитной функции обычно подпадают под категории “операционные” или “неоперационные” в соответствии с разделом 10.1.2.

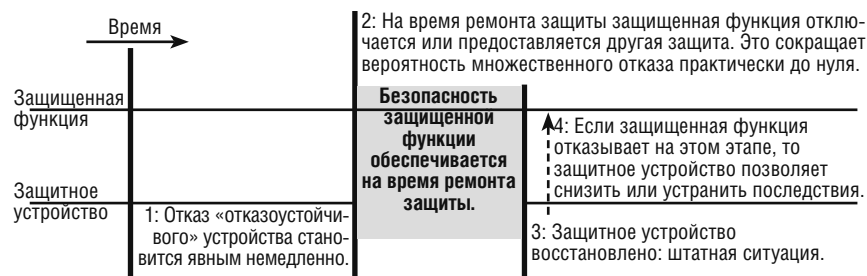


РИС. 5 ЯВНЫЙ ОТКАЗ ЗАЩИТНОЙ ФУНКЦИИ

10.1.1.2 Защитные функции, отказ которых не очевиден — чтобы определить скрытые отказы, необходимо поставить вопрос «Будут ли результаты этого режима отказа очевидными для технического персонала в стандартных рабочих условиях, если режим отказа возникнет независимо от их действий?»

Если ответ на этот вопрос отрицательный, то режим отказа является скрытым. Если ответ положительный, то он очевиден. Обратите внимание, что в этом контексте возникновение «независимо от действий персонала» означает отсутствие других отказов. Следует также отметить, что на данном этапе анализа предполагается, что попытки проверки работоспособности связанной функции не предпринимаются. Это связано с тем, что такие проверки являются формой регулярного обслуживания, а цель анализа состоит в определении необходимости такого обслуживания.

Если такой режим отказа возникает, то тот факт, что защита не выполняет свою функцию, не станет очевидным при стандартных условиях. Существование таких режимов отказов в любой момент времени создает четыре возможных сценария, два из которых применяются к очевидным отказам защитных функций. Первый сценарий: отказы функций не возникают, продолжается работа в штатном режиме.

Второй сценарий: защищенная функция отказывается, защита остается функциональной. В этом случае защита выполняет свою задачу и в зависимости от своего вида снижает или устраняет последствия отказа защищенной функции.

Третий сценарий: защита отказывается, а защищенная функция продолжает работать. В этом случае отказ защиты не имеет прямых последствий. Более того, никто не знает о том, что произошел отказ защиты.

Четвертый сценарий: вначале отказывается защита, а потом отказывается защищенная функция. Такая ситуация называется множественным отказом. Это вполне вероятная ситуация, так как отказ защиты не очевиден, и никто не будет знать о необходимости проведения корректирующих или альтернативных мероприятий, чтобы избежать множественного отказа.

Последовательность событий, ведущих к множественному отказу, представлена на рис. 6.

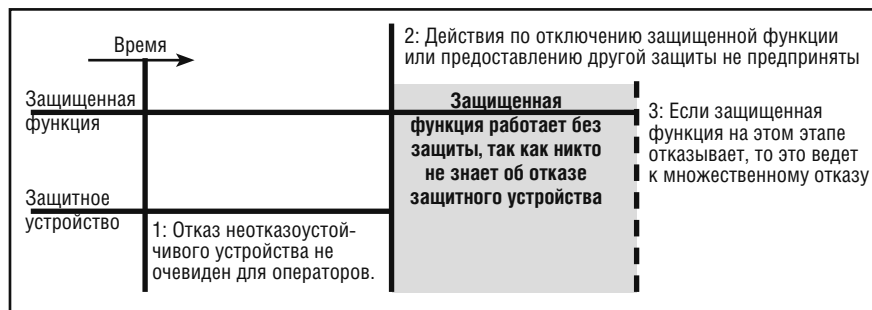


РИС. 6 СКРЫТЫЙ ОТКАЗ ЗАЩИТНОЙ ФУНКЦИИ

10.1.2 ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ, ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ОПЕРАЦИОННЫЕ И НЕОПЕРАЦИОННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ — «Процесс категоризации последствий должен разграничивать события (режимы отказов и множественные отказы) с последствиями для безопасности и/или окружающей среды и события, имеющие только экономические последствия (операционные и неоперационные)». (SAE JA1011, раздел 5.5.1.2)

ПРИМЕЧАНИЕ. В этом разделе термин «отказ» означает режим отказа или множественный отказ.

10.1.2.1 Последствия для безопасности — отказ имеет последствия для безопасности, если имеется существенная вероятность того, что он может вызывать травму или смерть человека. Понятия «существенной» и «несущественной» вероятности более подробно описываются в разделе 12.1.3 настоящего руководства.

10.1.2.2 Последствия для окружающей среды — на другом уровне под «безопасностью» понимается безопасность или благополучие общества в целом. Подобные отказы классифицируются как отказы с влиянием на окружающую среду. Ожидания общества принимают форму муниципальных, региональных и национальных стандартов по защите окружающей среды. Кроме того, некоторые корпорации имеют собственные, более строгие стандарты. В результате отказ имеет последствия для окружающей среды при наличии существенной вероятности нарушения любого известного стандарта или норматива по защите окружающей среды.

10.1.2.3 *Операционные последствия* — основная функция оборудования в сфере коммерции и промышленности связана с получением прибыли или поддержкой приносящих прибыль операций. Отказы, влияющие на основные функции оборудования, затрагивают прибыльность организации. Ущерб от таких отказов зависит от интенсивности использования оборудования и наличия альтернатив. При этом практически во всех ситуациях вызванные затраты больше (часто существенно больше) стоимости устранения отказов, и эти затраты необходимо учитывать при оценке экономической эффективности любой политики управления отказами. В общем случае отказы влияют на операционную деятельность четырьмя способами:

- a. Влияние на общую производительность и пропускную способность.
- b. Влияние на качество продукции.
- c. Влияние на уровень обслуживания клиентов (возможны штрафные санкции).
- d. Увеличение операционных затрат в дополнение к прямым расходам на устранение отказа.

В некоммерческих организациях (например, на военных предприятиях) многие отказы также влияют на способность организации выполнять свою основную функцию, что иногда приводит к катастрофическим последствиям. Несмотря на то, что оценка стоимости проигранного сражения или даже войны затруднена, отказы, влияющие на операционную деятельность, все равно имеют экономические последствия. Если они возникают слишком часто, то придется развернуть, например, 60 танков вместо 50 или шесть авианосцев вместо пяти. Избыточность такого масштаба может быть крайне затратной.

В связи с этим, если очевидный отказ не угрожает безопасности и окружающей среде, следующим аспектом внимания процесса RCM являются операционные последствия отказа.

Так как эти последствия, как правило, имеют экономическую природу, они обычно оцениваются в денежном выражении. В то же время в крайних случаях (например, при поражении в войне) последствия могут быть выражены и в качественной форме. На практике общий экономический эффект любого отказа, имеющего операционные последствия, зависит от двух факторов:

- a. Сколько стоит каждый отказ в соответствии с его влиянием на операционную деятельность и стоимостью устранения отказа и всех вторичных повреждений.
- b. Как часто он возникает.

10.1.2.4 *Неоперационные последствия* — последствия очевидного отказа, которые не имеют прямого негативного влияния на безопасность, окружающую среду или операционную деятельность, называются неоперационными. Единственными последствиями таких отказов являются затраты на устранение самого отказа и вторичных повреждений, то есть они также являются экономическими.

10.1.3 RCM И ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО/НОРМЫ В СФЕРЕ БЕЗОПАСНОСТИ — часто возникает вопрос о связи RCM и задач, указанных регулирующими органами (законодательство по защите окружающей среды рассматривается напрямую).

Большинство норм по обеспечению безопасности просто требуют от пользователей продемонстрировать то, что их действия безопасны и защищают оборудование. Это привело к тому, что все большее значение приобретает схема сквозной проверки, в ходе которой пользователям оборудования требуется представить документальные доказательства наличия рациональной и обоснованной основы существующих программ обслуживания. В большинстве случаев RCM позволяет полностью удовлетворить такие требования.

В то же время некоторые нормы требуют выполнения определенных задач для определенного оборудования с указанной периодичностью. Часто возникает ситуация, в которой процесс RCM предлагает другую задачу и/или другой интервал, и в большинстве случаев задача, определенная на основе RCM, является более эффективной. В такой ситуации разумным решением является выполнение задачи в соответствии с нормами и обсуждение предложенного изменения с регулирующими органами.

10.2 Оценка последствий отказов — «Оценка последствий отказов должна выполняться так, как будто в данный момент не выполняется конкретной задачи по предвидению, предотвращению или обнаружению отказа». (SAE JA1011, раздел 5.5.2)

В силу причин, приведенных в пункте 9.1 настоящего руководства, при определении последствий отказов необходимо предположить, что профилактическое обслуживание не выполняется.

11. Выбор политики управления отказами

11.1 Взаимосвязь между сроком эксплуатации и отказом — «В процессе выбора политики управления отказами должен учитываться факт повышения условной вероятности некоторых режимов отказа по мере увеличения срока эксплуатации (или подверженности напряжениям), отсутствия зависимости условной вероятности от срока эксплуатации в других случаях, а также снижение условной вероятности отказов со временем в третьей группе режимов отказа». (SAE JA1011, раздел 5.6.1)

Один из важнейших факторов, влияющих на выбор политики управления отказами, — взаимосвязь между сроком эксплуатации (или подверженности напряжениям) и отказом. Существует шесть групп видов зависимости условной вероятности отказа от срока эксплуатации элемента; они показаны на рис. 7.

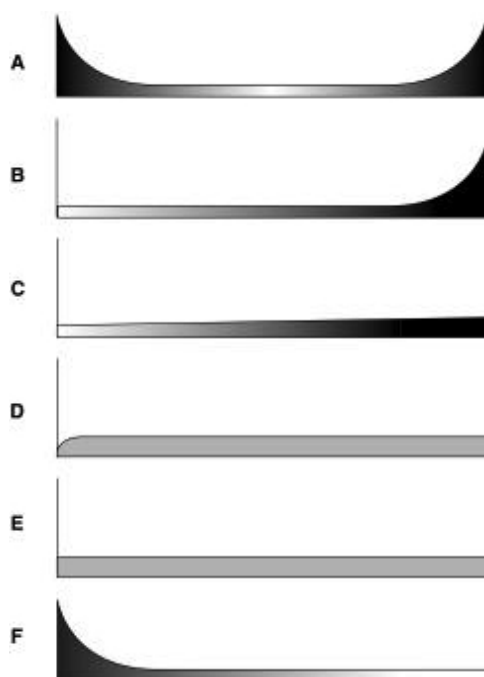


РИС. 7 ШЕСТЬ СХЕМ ОТКАЗА

На схемах А и В показана точка, в которой условная вероятность отказа резко возрастает (эта точка иногда называется «зоной износа»). На схеме С вероятность отказа монотонно возрастает, однако отчетливая зона износа не просматривается. На схеме D можно наблюдать низкую условную вероятность отказа для нового элемента, которая затем резко возрастает до постоянного или медленно растущего уровня, а на схеме E условная вероятность отказа постоянна в течение всего срока эксплуатации (случайный отказ). На схеме F сначала наблюдается высокая вероятность отказа для нового элемента, которая затем снижается до постоянного или медленно растущего уровня.

В целом, схемы отказов, зависящих от срока эксплуатации, применимы как к очень простым, так и к сложным элементам, подверженным преобладающему режиму отказа. На практике они часто связаны с прямым износом (чаще всего при непосредственном контакте оборудования с продуктом), усталостными разрушениями, коррозией, окислением и испарением.

11.2 Техническая возможность и целесообразность — «Все запланированные задачи должны быть технически возможными и целесообразными (уместными и эффективными)...» (JA1011, раздел 5.6.2). Любые запланированные задачи являются целесообразными лишь в том случае, если они позволяют сократить (избежать, устранить или свести к минимуму) последствия режима отказа настолько, что эффект от такой меры оправдывает прямые и косвенные издержки на выполнение задачи. (Следует отметить, что в этом контексте встроенные устройства контроля представляют собой «запланированную задачу», однако автоматически выполняемую контрольным устройством, непрерывно или с предварительно определенными интервалами). Следовательно, к ним должны применяться те же критерии выбора, что и к другим формам запланированных задач. Следует отметить также, что такие устройства сами по себе требуют проектирования, монтажа и обслуживания, что следует учитывать при оценке экономической эффективности.

Если подобрать подходящую запланированную задачу не удастся, и последствия режима отказа являются неприемлемыми для владельца или пользователя основных фондов, то следует разработать иные меры по решению проблемы последствий отказа.

Разумеется, также должна быть обеспечена техническая возможность влияния политики управления отказами на последствия отказа. Техническая осуществимость (или уместность) такой политики зависит от технических характеристик самой политики и от рассматриваемого режима отказа. Критерии технической осуществимости подробнее рассматриваются в разделах 12 – 14 настоящего руководства.

11.3 Экономическая эффективность — «Если технически осуществимыми и целесообразными (уместными и действенными) являются две или более политики управления отказами, то должна быть выбрана наиболее экономически эффективная политика». (SAE JA1011, раздел 5.6.3)

Учитывая количество доступных вариантов политики управления отказами (особенно приемов предупредительного технического обслуживания и контроля состояния) нередко возникает соблазн выбора политики исключительно на основе технического совершенства, а не экономической эффективности. Если технически уместны несколько вариантов политики управления отказами, правильное применение RCM всегда означает выбор политики, удовлетворительно справляющейся с последствиями отказа при наибольшей экономической эффективности, а не наиболее технически совершенной политики.

11.4 Выбор политики управления отказами — «Выбор политики управления отказами должен выполняться так, как будто в данный момент не выполняется конкретной задачи по предвидению, предотвращению или обнаружению отказа». (SAE JA1011, раздел 5.6.4)

Опять же, в силу причин, приведенных в пункте 9.1 настоящего руководства, при выборе политики управления отказами необходимо предположить, что профилактическое обслуживание не выполняется.

12. Управление последствиями отказов

12.1 Явные режимы отказов с последствиями для безопасности или окружающей среды — «В случае явного режима отказа с последствиями для безопасности или окружающей среды задача должна снижать вероятность режима отказа до уровня, который является допустимым с точки зрения владельца или пользователя основных фондов». (SAE JA1011, раздел 5.7.1.1)

Несмотря на то, что большинство людей предпочло бы жить в среде, исключаящую любую возможность смерти или травм, элемент риска присутствует в любой деятельности. Иными словами, «ноль» недостижим. Что же достижимо?

Для ответа на этот вопрос необходимо подробнее рассмотреть вопрос риска.

Оценка риска состоит из трех элементов. Первый связан с ответом на вопрос, что произойдет, если рассматриваемое событие все же случится. Второй — насколько вообще вероятно это событие. Комбинация этих двух элементов позволяет оценить степень риска. Третий, и часто наиболее противоречивый элемент, — вопрос допустимости этого риска.

Например, рассмотрим режим отказа, который может привести к смерти или травмированию десяти человек (возможные последствия). Вероятность возникновения этого режима отказа составляет 1 к 1000 в течение каждого года (вероятность возникновения события). На основании этих значений можно рассчитать риск, связанный с этим режимом отказа:

$$10 \times (1 \text{ к } 1000) = 1 \text{ жертва за } 100 \text{ лет}$$

Теперь рассмотрим второй режим отказа, который может привести к 1000 жертв, однако вероятность которого составляет 1 к 100 000 в течение каждого года. С этим режимом отказа связан следующий риск:

$$1000 \times (1 \text{ к } 100 \text{ 000}) = 1 \text{ жертва за } 100 \text{ лет}$$

В этих примерах риск одинаковый, однако значения, на которых основана оценка риска, разительно отличаются. Отметим также, что в этих примерах не содержится суждения о допустимости риска, дается только количественная оценка. Вопрос о допустимости риска — это отдельная проблема, которая будет рассмотрена позже.

(Термины «вероятность» (шанс возникновения режима отказа 1 к 10 в течение определенного периода) и «интенсивность отказов» (в среднем один раз за 10 периодов, что соответствует среднему времени наработки на отказ (MTBF) 10 периодов), если они применяются к случайным отказам, обычно считаются взаимозаменяемыми. В строгом смысле это не так. Однако если среднее время наработки на отказ — более примерно 4 периодов, различие столь мало, что им почти всегда можно пренебречь).

В следующих параграфах каждый из трех элементов риска рассматривается более подробно.

12.1.1 ЧТО МОЖЕТ ПРОИЗОЙТИ В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДАННОГО РЕЖИМА ОТКАЗА? — В список последствий отказов должно быть включено точное описание событий, которые могут произойти в результате возникновения каждого режима отказа. Иными словами, в определении последствий отказа должен быть указан конкретный характер режима отказа: шанс гибели одного человека один из десяти, высокая вероятность гибели до десяти человек, или высокая вероятность нанесения тяжелых увечий оператору установки. Обратите внимание, что для обеспечения разумной консервативности определение последствий отказа должно отражать «типичный наиболее неблагоприятный сценарий» (но не экстремально неблагоприятный сценарий, использование которого было бы чрезмерно консервативным). В случае сомнений лица, проводящие анализ, должны задать себе вопрос: в случае наихудшего развития событий, какую точку зрения посчитает заслуживающей оправдания та инстанция, которая будет привлекать к ответственности этих лиц и их руководителей.

12.1.2 НАСКОЛЬКО ВЕРОЯТНО ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДАННОГО РЕЖИМА ОТКАЗА? — В разделе 8.1 настоящего руководства указано, что в анализе характера и последствий отказа (FMEA) должны быть записаны только режимы отказа, возникновения которых можно разумно ожидать в рассматриваемом контексте. Таким образом, если анализ FMEA подготовлен на реалистичной основе, сам факт наличия режима отказа в списке подразумевает наличие конечной вероятности его возникновения. В идеальном случае этой вероятности должна быть дана количественная оценка — либо в рамках определения последствий отказа, либо в отдельной базе данных — что позволяет количественно оценить и риск. (Следует отметить, что на практике точные исторические данные об отказах часто отсутствуют, особенно в случае нового оборудования, в котором в значительной степени воплощены новые технологии. В таких случаях оценка должна основываться на разумных предположениях лиц, имеющих ясное представление о рассматриваемом оборудовании и контексте, в котором предполагается его использование).

12.1.3 ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ РИСК ДОПУСТИМЫМ? — Как уже указывалось ранее, риск — это вероятность, умноженная на серьезность последствий. Обычно риск выражается в годовом исчислении (однако его можно выразить и в виде числа событий в течение определенного числа циклов или часов работы, или в любых других единицах, имеющих смысл в рассматриваемом контексте). Определение допустимости риска — совершенно другое дело.

Представления о том, какой уровень риска смерти или травмирования является допустимым, значительно различаются у разных людей и групп. На эти представления оказывает влияние множество факторов. Преобладают два фактора: степень контроля над ситуацией, которой обладает участник процесса по его мнению, и преимущества, которые люди получают, как им кажется, подвергая себя риску. Эти соображения в свою очередь влияют на готовность добровольно подвергаться риску. Такие взгляды необходимо затем преобразовать в уровень риска, который мог бы считаться допустимым всей популяцией (всеми рабочими на площадке, всеми жителями города или даже всем населением страны).

Иными словами, если для сотрудника допустимой является ежегодная вероятность гибели на рабочем месте 1 к 100 000 (10–5), и 1000 его коллег разделяет эту точку зрения, то все они согласны принять, что в среднем на площадке погибнет один человек за 100 лет, причем этим человеком может стать сам дающий оценку, и это может произойти в этом году.

Следует учитывать, что любая подобная количественная оценка может рассматриваться только как грубое приближение. Иными словами, допустимая вероятность 10–5 — это всегда не более чем приблизительная оценка. Сознывая это, на следующем этапе необходимо преобразовать вероятность гибели на рабочем месте в результате любого события, с которой отдельный сотрудник и его коллеги готовы смириться, в допустимую вероятность для каждого отдельного события (режима отказа или множественного отказа), способного привести к чьей-либо гибели.

Например, продолжая логику предыдущего примера, пусть вероятность гибели любого из 1000 коллег в течение каждого года составляет 1 к 100 (предположим, что каждый присутствующий на площадке подвергается примерно равной опасности). Если в результате деятельности на площадке происходит (предположим) 10 000 событий, потенциально способных привести к чьей-либо гибели, то средняя вероятность гибели одного человека в результате каждого события должна быть сокращена до 10–6 в течение каждого года. Это значит, что вероятность события, способного погубить десятерых, должна быть сокращена до 10–7, а вероятность события, способного привести к одной человеческой жертве с шансом 1 к 10 должна быть сокращена до 10–5. (Приемы, используемые для перемещения вероятностей вверх и вниз в иерархии, называются вероятностной или количественной оценкой риска).

Несмотря на то, что рассматриваемые выше проблемы обычно являются преобладающими факторами в решениях о допустимости риска, они не являются единственными. При определении допустимости риска используются и дополнительные факторы, в том числе личные и отраслевые морально-этические ценности, степень осведомленности о реальных эффектах и последствиях каждого из режимов отказа, ценность человеческой жизни с точки зрения разных культурных групп, религиозные ценности, а также возраст и семейное положение потенциальной жертвы аварии.

12.1.4 КТО ДОЛЖЕН ОЦЕНИВАТЬ РИСКИ? — Само разнообразие рассмотренных выше факторов означает, что в данный момент времени любой конкретный человек, и даже одна организация, часто не может принимать решение о «допустимости» риска за всех рискующих. Более того, на данный момент существует очень мало организаций, в которых использовалась бы формальная методология определения допустимого риска. В отсутствие такой методологии допустимость может быть определена группой, состоящей из следующих лиц:

- a. Лица, которые с большой степенью вероятности могут обладать ясным представлением о механизме отказа, о последствиях отказа (особенно о природе всех опасностей), о вероятности режима отказа и о возможных мерах предупреждения или предотвращения отказа.
- b. Лица, обладающие обоснованными взглядами на допустимость или недопустимость рисков. Они могут быть представителями следующих групп:
 1. Потенциальные жертвы (операторы или обслуживающий персонал в случае непосредственных угроз безопасности, или сообщество в целом, если речь идет об угрозах окружающей среде).
 2. Лица, в чьи обязанности входит работа с последствиями травмирования или гибели, либо нарушения стандартов защиты окружающей среды (например, руководство).

Однако если в организации уже определены уровни риска, которые считаются допустимыми всеми заинтересованными сторонами, то при определении уместности политики управления отказами, угрожающими безопасности или окружающей среде, можно использовать эти уровни.

12.1.5 БЕЗОПАСНОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ ОТКАЗАМИ — если существует недопустимый риск возникновения угрозы безопасности или окружающей среде в результате режима отказа, процесс RCM требует попытки сокращения вероятности режима отказа, его последствий, или обеих составляющих, до такого уровня, чтобы общий риск был снижен до допустимого уровня. Отсюда следует, что в случае режимов отказа, с которыми связаны последствия для безопасности или окружающей среды, политика управления отказами является целесообразной только в том случае, если риск режима отказа снижается до допустимого уровня.

Следует отметить, что при работе с явными режимами отказа, с которыми связаны последствия для безопасности или окружающей среды, стоимость режима отказа в RCM не учитывается. Если риск является недопустимым, он должен быть снижен до допустимого уровня: либо путем организации адекватной проактивной задачи (или задач), либо путем изменения проекта или технологического регламента таким образом, чтобы риск был сокращен до допустимого уровня.

12.1 Скрытые режимы отказов с последствиями для безопасности или окружающей среды — «В случае скрытого режима отказа, если соответствующий множественный отказ связан с последствиями для безопасности или окружающей среды, задача должна снижать вероятность скрытого режима отказа до уровня, который является допустимым с точки зрения владельца или пользователя основных фондов». (SAE JA1011, раздел 5.7.1.2)

Как уже было показано выше, множественный отказ возникает только в том случае, если отказ защищенной функции происходит при отказавшей защите. Это означает, что вероятность множественного отказа в течение определенного периода задается вероятностью отказа защищенной функции при отказе защиты в течение того же периода. Эту вероятность можно рассчитать следующим образом по формуле 1:

$$\text{Вероятность множественного отказа} = \text{вероятность отказа защищенной функции} \times \text{средняя недоступность защиты} \quad (\text{ФОРМУЛА 1})$$

В случае множественных отказов, с которыми связаны последствия для безопасности или окружающей среды, допустимая вероятность определяется в соответствии с п.п. 12.1.3 и 12.1.4. Вероятность отказа (или интенсивности отказов) защищенной функции обычно задана условиями расчета. Таким образом, если известны эти две переменные, допустимую недоступность защитной функции можно выразить по формуле 2:

$$\text{Допустимая недоступность защиты} = \frac{\text{Допустимая вероятность множественного отказа}}{\text{вероятность отказа защищенной функции}} \quad (\text{ФОРМУЛА 2})$$

Таким образом, ключевым элементом эффективности, требуемым от любой защиты, подверженной скрытому режиму отказа, является максимальная недоступность, разрешенная при соблюдении допустимого уровня вероятности связанного множественного отказа. Эта недоступность определяется в три этапа:

- a. Определение вероятности множественного отказа, которая считается допустимой в организации, в соответствии с описанием в п.п. 12.1.3 и 12.1.4, если такая вероятность еще не определена.
- b. Определение вероятности отказа защищенной функции в течение рассматриваемого периода (это значение иногда называется «периодичностью ремонта»).
- c. Наконец, определение недоступности (также называемой «дробное время простоя») защиты, которая обеспечивает допустимую вероятность множественного отказа.

Следует отметить, что обычно возможно одновременно варьировать вероятность непредвиденного отказа защищенной функции и (особенно) недоступность защитной функции путем применения подходящей политики управления отказами. В результате путем принятия подобных политик также существует возможность снизить вероятность множественного отказа практически до любого требуемого разумного уровня. (Нулевая вероятность, разумеется, остается недостижимым идеалом).

12.3 Явные режимы отказов с экономическими последствиями — «В случае явного режима отказа, с которым не связаны последствия для безопасности или окружающей среды, прямые и косвенные затраты на выполнение задачи за определенный период времени должны быть меньше, чем прямые и косвенные потери от режима отказа за аналогичный период». (SAE JA1011, раздел 5.7.1.3)

В разделах 10.1.2.3 и 10.1.2.4 описаны ключевые элементы экономических последствий режима отказа. В этих разделах также показано, что экономические последствия состоят из эксплуатационных и неэксплуатационных последствий, и что их оценка должна проводиться в предположении, что не выполняется каких-либо запланированных задач по управлению отказами.

Если последствия отказа носят экономический характер, то общая сумма ущерба организации за период времени определяется не только масштабами последствий, но и частотой их возникновения. Аналогично, общие затраты организации на выполнение запланированных задач должны определяться общими затратами на выполнение задачи и частотой ее выполнения. В этом контексте при определении общих затрат на выполнение задачи должны учитываться затраты на выполнение самой задачи плюс необходимость время от времени выполнять дополнительные работы в связи с задачей. Например, может требоваться еженедельная проверка подшипника на наличие шумов и замена шумящего подшипника в среднем раз в четыре года или пять лет.

Следовательно, для оценки экономической целесообразности какой-либо задачи необходимо сравнивать общий ущерб от режима отказа за определенный период с общими затратами на политику управления отказами за равный период. (В большинстве случаев сравнение этих затрат выполняется путем приведения их к годовым значениям).

Если затраты на выполнение задачи в течение этого периода ниже, чем общий ущерб от режима отказа, то задача является целесообразной. В противном случае задача является неприменимой, и следует рассмотреть другие варианты политики управления отказами.

Следует отметить, что при наличии разумной степени уверенности в повышении условной вероятности режима отказа по мере эксплуатации оборудования, то при оценке целесообразности запланированной задачи для сравнения следует использовать период достаточно длительный, чтобы охватывать как начало эксплуатации, так и период повышенной вероятности отказа.

Кроме того отметим, что если остаточный полезный срок службы основного средства значительно короче, чем среднее время между возникновением режима отказа (особенно в случае отказов, связанных с возрастом оборудования), может быть оправдано принятие этого соображения во внимание при оценке экономической целесообразности запланированной задачи.

12.3 Скрытые режимы отказов с экономическими последствиями — «В случае скрытого режима отказа, с которым связан множественный отказ, не представляющий угрозы для безопасности или окружающей среды, прямые и непрямые затраты на выполнение задачи за определенный период времени должны быть меньше, чем прямые и непрямые потери от режима множественного отказа плюс стоимость ремонта скрытого режима отказа за аналогичный период». (SAE JA1011, раздел 5.7.1.4)

Множественные отказы, с которыми связаны только экономические (эксплуатационные или неэксплуатационные) последствия, приводят к издержкам. С издержками также связано управление отказами. В результате обычно удается определить политику управления отказами, которая позволяет свести к минимуму общие затраты на управление скрытым отказом. В таких случаях в качестве первого шага необходимо определить политику управления отказами, которая приводит к минимальной сумме общих затрат в годовом исчислении, а затем убедиться, является ли такой (даже сведенный к минимуму) финансовый риск допустимым для владельцев/пользователей основных средств.

13. Политики управления отказами — запланированные задачи

13.1 Задачи по состоянию — «Любая выбранная задача по состоянию (или предупредительная задача, задача, основанная на состоянии, либо задача контроля состояния) должна соответствовать следующим дополнительным критериям:

- a. Должен существовать ясно определенный потенциальный отказ.
- b. Должен существовать выявляемый интервал P-F (или период развития отказа).
- c. Интервал выполнения задачи должен быть короче вероятного интервала P-F.
- d. Должно быть физически возможно регулярное выполнение задачи с интервалом, меньшим, чем интервал P-F.
- e. Кратчайшее время между обнаружением потенциального отказа и возникновением функционального отказа (интервал P-F минус интервал выполнения задачи) должно быть достаточно продолжительным, чтобы позволять выполнение заранее определенного действия по избежанию, устранению или минимизации последствий режима отказа». (SAE JA1011, раздел 5.7.2)

13.1.1 ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ОТКАЗЫ И КРИВАЯ P-F — большая часть режимов отказа возникает не мгновенно. В таких случаях обычно возможно обнаружить последние стадии ухудшения характеристик элементов перед возникновением состояния отказа. Такие признаки приближающегося отказа называются «потенциальным отказом», который определяется как «выявляемое условие, указывающее на то, что функциональный отказ может произойти или процессы, приводящие к нему, уже запущены». Если обнаружить это состояние, возникает возможность принять меры к предотвращению полного отказа элемента и/или к избежанию последствий режима отказа.

На рис. 8 показаны последние стадии процесса отказа. Эта кривая называется кривой P-F, поскольку она показывает начало отказа, ухудшение характеристик до точки возможного выявления («P»), а затем, если отказ не обнаружен и не исправлен, продолжение ухудшения — обычно ускоряющегося — до достижения точки функционального отказа («F»).

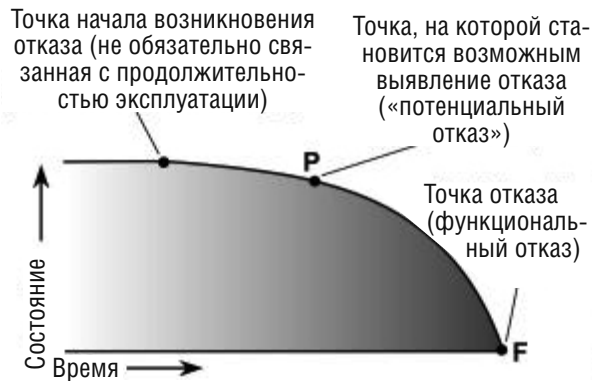


РИС. 8 КРИВАЯ P-F

В случае выявления потенциального отказа между точкой P и точкой F на рис. 8, в этой точке можно принять меры к предотвращению функционального отказа и/или избежанию его последствий. (Возможность принятия осмысленных мер зависит от быстроты наступления функционального отказа, как показано ниже). Задачи, рассчитанные на выявление потенциальных отказов, называются задачами по состоянию.

Задачи по состоянию так называются, поскольку инспектируемые элементы остаются в эксплуатации условно, пока их состояние соответствует стандартам производительности — иными словами, пока вероятность возникновения рассматриваемого режима отказа до следующей проверки невелика. Также такая деятельность называется предупредительным техническим обслуживанием (поскольку ставится цель предсказать по текущему поведению элемента отказ, момент отказа, если возможно, и предупредить его) или техническим обслуживанием на основе состояния (поскольку необходимость исправления или недопущения последствий отказа определяется по состоянию элемента).

13.1.2 ИНТЕРВАЛ P-F — кроме собственно потенциального отказа необходимо также учитывать время (или количество циклов нагружения), проходящее между точкой возникновения потенциального отказа (иными словами, точкой возможного выявления) и точкой развития потенциального отказа до функционального. Как показано на рис. 9, такой интервал называется интервалом P-F.

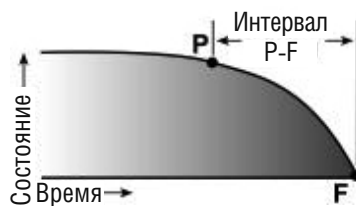


РИС. 9 ИНТЕРВАЛ P-F

Интервалом P-F определяется частота выполнения задач по состоянию. Для обеспечения выявления потенциального отказа, пока он не развился в функциональный, интервал между проверками должен быть короче интервала P-F. Также состояние потенциального отказа обязательно должно проявляться достаточно ясно, чтобы работник, обученный выполнению проверки, мог выявить потенциальный отказ, если он возникнет, и когда он возникнет. По крайней мере вероятность необнаружения потенциального отказа должна быть достаточно низкой, чтобы вероятность непредвиденного режима отказа была сокращена до уровня, допустимого для владельца или пользователя основных средств.

Интервал P-F также называется временем предупреждения, временем наработки на функциональный отказ или периодом развития отказа. Этот интервал может измеряться в любых единицах, отражающих продолжительность подверженности напряжениям (время работы, выпущенные единицы, циклы пуска-останова и т.д.). Для разных режимов отказа интервал может составлять от долей секунды до десятилетий.

Следует отметить, что если задача по состоянию выполняется с интервалами длиннее интервала P-F, то существует вероятность полного упущения потенциального отказа. С другой стороны, если интервал выполнения задачи чрезмерно короток по сравнению с интервалом P-F, на процесс проверки будут затрачиваться избыточные ресурсы.

На практике всегда должны выбираться интервалы выполнения задач короче, чем самый короткий вероятный интервал P-F. В большинстве случаев достаточно выбрать интервал выполнения задачи, равный половине интервала P-F. Однако в некоторых случаях оправданы интервалы, составляющие другую долю интервала P-F. Это может зависеть от требуемого интервала P-F нетто (рассматриваемого ниже) или от наличия у пользователя основных средств исторических данных, указывающих на оправданность другой продолжительности интервала.

13.1.3 ИНТЕРВАЛ P-F НЕТТО — это минимальный ожидаемый интервал между обнаружением потенциального отказа и возникновением функционального отказа. Иллюстрация приведена на рис. 10, где показан процесс отказа с интервалом P-F, равным девяти месяцам. На рисунке видно, что в случае ежемесячной проверки элемента интервал P-F нетто составляет 8 месяцев. С другой стороны, если проверка выполняется раз в шесть месяцев, интервал P-F нетто составит 3 месяца. Таким образом, в первом случае минимальное время для принятия мер к потенциальному отказу на пять месяцев дольше, чем во втором случае, однако задача по состоянию должна выполняться в шесть раз чаще.

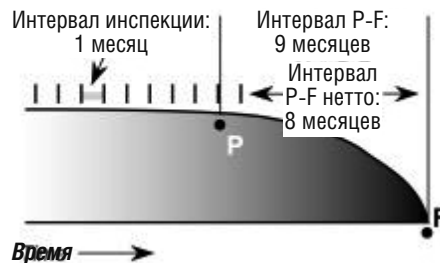


РИС. 10 ИНТЕРВАЛ P-F НЕТТО

От интервала P-F нетто зависит продолжительность периода, в течение которого можно принять меры к сокращению или устранению последствий режима отказа. Задача по состоянию является технически осуществимой, если интервал P-F нетто длиннее периода, требуемого для недопущения или сокращения последствий режима отказа. Если продолжительность интервала P-F нетто слишком мала или слишком велика для выполнения разумных действий, то задача по состоянию не является технически осуществимой. На практике требуемый период изменяется в широком диапазоне. В некоторых случаях он может составлять часы (например, до конца цикла эксплуатации или до конца смены) или даже минуты (для останова машины или эвакуации здания). В других случаях могут требоваться недели или даже месяцы (например, до остановки на капремонт). В целом предпочтительными являются более длинные интервалы PF, тому есть две причины:

- a. В таком случае можно выполнить все необходимые действия для недопущения последствий режима отказа (в том числе планирование корректирующих действий) более продуманным и, следовательно, более управляемым образом.
- b. Сокращается количество требуемых инспекций по состоянию.

По этой причине огромные усилия прилагаются к отысканию состояний предварительного отказа и приемов обслуживания по состоянию, позволяющих установить максимально длинные интервалы P-F. Однако в некоторых случаях удается использовать весьма короткие интервалы P-F.

13.1.4 ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ИНТЕРВАЛОМ P-F И СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

13.1.4.1 Интервалы P-F и случайные отказы — если эти принципы применяются впервые, часто сложно различить между «сроком службы» компонента и интервалом P-F. Это ведет к привязыванию частоты выполнения задач по состоянию к действительному или мнимому «сроку службы» элемента. Если такой срок жизни и имеет какой-либо физический смысл, его продолжительность намного превышает длину интервала P-F, поэтому основанная на нем задача не может привести к существенным результатам. В реальности срок службы компонента измеряется в прямом направлении с момента ввода в эксплуатацию. Интервал P-F измеряется в обратном направлении от момента функционального отказа, поэтому эти концепции нередко бывают абсолютно не связаны между собой. Их важно различать, поскольку предупреждения могут с тем же успехом возникать и для режимов отказа, не связанных с продолжительностью эксплуатации (т.е. случайных отказов).

Например, на рис. 11 показан компонент, соответствующий схеме случайных отказов (схема E). Отказ одного из компонентов произошел через пять лет, второго — через шесть месяцев, а третьего — через два года. В каждом из случаев функциональному отказу предшествовал потенциальный отказ с интервалом P-F, равным четырем месяцам.

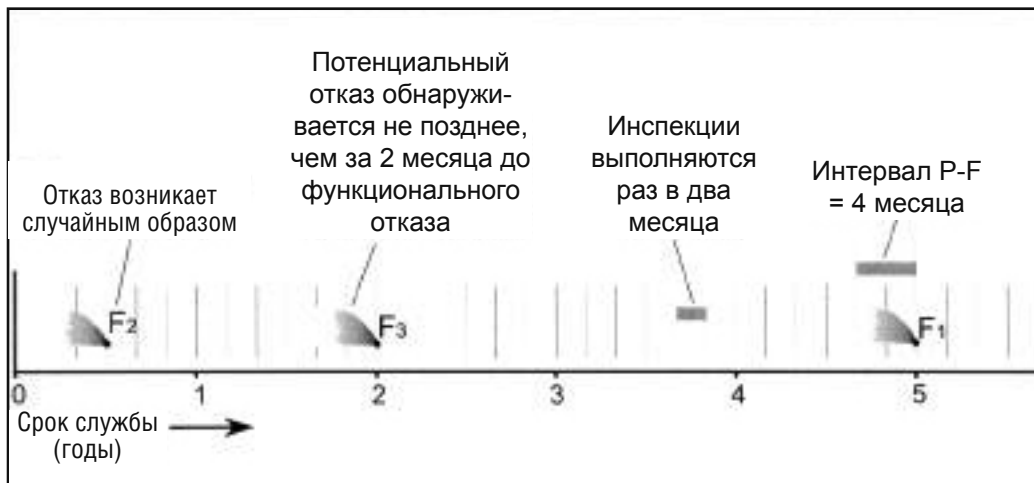


РИС. 11 СЛУЧАЙНЫЕ ОТКАЗЫ И ИНТЕРВАЛ P-F

На рис. 11 показано, что для выявления потенциального отказа задача инспекции должна выполняться раз в два месяца. Поскольку режимы отказа возникают случайным образом, предсказать время возникновения следующего невозможно, поэтому цикл инспекций должен начинаться с момента ввода компонента в эксплуатацию. Иными словами, график инспекций никак не связан со сроком службы или продолжительностью эксплуатации компонента.

Однако это не значит, что задачи по состоянию применимы только к компонентам, подверженным случайным отказам. Они применимы также к компонентам, режимы отказа которых связаны со сроком эксплуатации, как показано ниже.

13.1.4.2 Интервалы P-F и режимы отказа, связанные со сроком службы — если характеристики компонента ухудшаются более или менее линейно в течение всего срока службы, представляется разумным предположение, что последние стадии ухудшения также окажутся более или менее линейными. Скорее всего, это верно для режимов отказа, связанных со сроком эксплуатации.

Например, рассмотрим износ шин. Поверхность шины изнашивается более или менее линейно, пока глубина рисунка протектора не достигнет установленного законодательством минимума. Если этот минимум составляет (предположим) 2 мм, то можно задать глубину рисунка протектора, превышающую 2 мм, которая обеспечивает адекватное предупреждение о приближающемся функциональном отказе. Это, конечно, и будет уровень потенциального отказа.

Если потенциальным отказом считается глубина (предположим) 3 мм, то интервал P-F соответствует пробегу, который выдержит шина, пока ее протектор истирается от 3 мм до 2 мм, как показано на рис. 12.

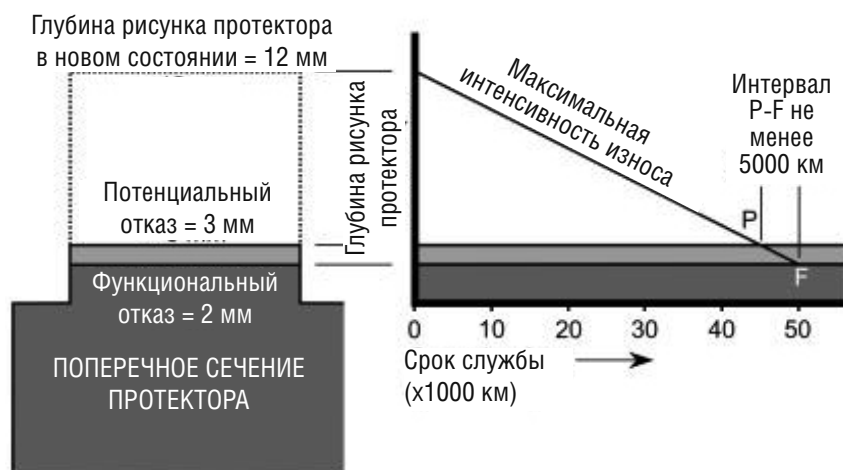


РИС. 12 ЛИНЕЙНАЯ КРИВАЯ P-F

По рис. 12 можно также предположить, что если шина вводится в эксплуатацию с глубиной рисунка протектора (предположим) 12 мм, то интервал P-F можно предсказать по типичному пробегу до восстановления протектора. Например, если восстановление протектора требуется после 50 000 км пробега, разумно предположить, что износ составляет 1 мм на 5000 км пробега. Таким образом, интервал P-F составляет 5000 км. Соответствующая задача по состоянию требует от водителя следующих действий: «Проверка глубины ресурса протектора после каждых 2500 км пробега и отчет о шинах, глубина протектора которых менее 3 мм».

Эта задача не только обеспечивает обнаружение износа до достижения законодательно установленного ограничения, но и предоставляет достаточный срок (в данном случае — 2500 км пробега) для планирования замены шины до полного износа.

В целом линейное ухудшение характеристик между точками P и F обычно встречается только в случаях, когда механизм отказа неразрывно связан со сроком службы.

13.1.5 ПОСТОЯНСТВО ИНТЕРВАЛА P-F — кривые P-F, которые рассматривались до сих пор в этом разделе руководства, показывают, что интервал P-F для каждого конкретного режима отказа является постоянным. Фактически это не соответствует действительности: некоторые интервалы проявляют изменчивость в пределах широкого диапазона значений, как показано на рис. 13. В этих случаях необходимо выбрать интервал выполнения задачи, более короткий, чем наименьший из вероятных интервалов P-F. Таким образом обеспечивается разумная степень уверенности в выявлении потенциального отказа до его развития в функциональный отказ. Если интервал P-F нетто, связанный с этим минимальным интервалом, является достаточно продолжительным для принятия мер к устранению последствий режима отказа, задача по состоянию является технически осуществимой.

С другой стороны, если интервал P-F чрезвычайно непостоянен, установить осмысленный интервал выполнения задачи невозможно, и от задачи следует отказаться в пользу какого-либо иного способа противостояния режиму отказа.

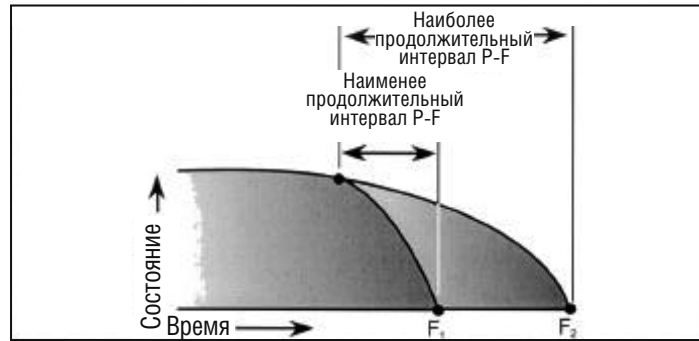


РИС. 13 НЕПОСТОЯННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ P-F

13.1.6 КАТЕГОРИИ МЕТОДИК ЗАДАЧ ПО СОСТОЯНИЮ — выделяют четыре основные категории методик задач по состоянию:

- a. Методики, основанные на изменении качества продукта. Во многих случаях возникновение дефекта в изделии, производимом на оборудовании, прямо следует из режима отказа в самом оборудовании. Многие из этих дефектов проявляются постепенно, обеспечивая, таким образом, заблаговременное предупреждение о потенциальных отказах.
- b. Методики контроля основных эффектов. Основные эффекты (скорость, расход, давление, температура, мощность, ток и т.д.) предоставляют еще один источник информации о состоянии оборудования. Эти эффекты может контролировать работник с измерительным прибором, компьютер в рамках системы управления процессом или самописец.
- c. Органолептические методики (основанные на зрении, слухе, осязании и обонянии операторов).
- d. Методики контроля состояния. Эти методики используются для обнаружения потенциальных отказов, связанных с использованием специализированного оборудования (которое иногда встраивается в контролируемое оборудование). Для отличия от других типов технического обслуживания по состоянию, эти методики называются контролем состояния.

Многим режимам отказа предшествует несколько (иногда множество) разных потенциальных отказов, поэтому может потребоваться более одной категории задач по состоянию. Для каждой из этих задач требуется разный интервал P-F, и каждая из них требует навыков разного типа и уровня. Это значит, что любая категория задач не будет наиболее экономически эффективной во всех случаях. Следовательно, для взвешенного выбора задач необходимо выполнять следующие условия.

- a. Следует учесть все выявляемые феномены, которые могут возникать перед каждым режимом отказа, вместе с полным диапазоном задач по состоянию, которые могут использоваться для выявления таких предупреждений.
- b. Следует строго применять критерии выбора задач RCM для определения, какие из задач (если таковые вообще найдутся) обеспечивают наиболее экономически эффективный способ предупреждения рассматриваемого режима отказа.

Следует отметить, что встроенные устройства, предназначенные для обнаружения режима отказа, имеющего место или приближающегося, должны удовлетворять тем же критериям технической осуществимости и целесообразности, что и техническое обслуживание по состоянию. Также важно отметить, что в случае добавления таких устройств к системе они формируют дополнительную функцию или функции, вносят дополнительные режимы отказа и требуют соответствующего анализа.

13.2 Задачи запланированного восстановления и запланированного списания — “Любая выбранная задача запланированного списания должна соответствовать следующим дополнительным критериям:

- a. Должен быть установлен точный срок (предпочтительно — с возможностью демонстрации), по истечении которого повышается условная вероятность перехода в рассматриваемое состояние отказа.
- b. Для снижения возможности преждевременного отказа до уровня, приемлемого для владельца или пользователя объекта, достаточно большая часть общего числа отказов должна происходить после истечения указанного срока.” (SAE JA1011, раздел 5.7.3)

Любая выбранная задача запланированного восстановления должна соответствовать следующим дополнительным критериям:

- a. Должен быть установлен точный срок (предпочтительно — с возможностью демонстрации), по истечении которого повышается условная вероятность перехода в рассматриваемое состояние отказа.
- b. Для снижения возможности преждевременного отказа до уровня, приемлемого для владельца или пользователя объекта, достаточно большая часть общего числа переходов в состояние отказа должна происходить после истечения указанного срока.
- c. Результатом выполнения задачи должно быть восстановление устойчивости компонента к отказу (состоянию отказа) до уровня, приемлемого для владельца или пользователя объекта.” (SAE JA1011, раздел 5.7.4)

Задачи запланированного восстановления и запланированного списания имеют ряд общих черт, поэтому в данном разделе руководства вначале рассматриваются общие характеристики, а затем — различия между этими задачами.

Запланированное восстановление предусматривает периодическое выполнение действия по восстановлению мощности элемента при достижении или до достижения определенного интервала (предельного срока эксплуатации) вне зависимости от его текущего состояния до уровня, обеспечивающего достаточную вероятность сохранения работоспособности до завершения следующего заданного интервала (не обязательно равного исходному интервалу). Обычно это действие предусматривает повторное изготовление отдельного компонента или капитальный ремонт всей установки.

Запланированное списание — запланированная задача, подразумевающая списание элемента или компонента при достижении или до достижения определенного срока эксплуатации независимо от его текущего состояния. Эта задача выполняется в случае, если есть уверенность в том, что в результате замены старого компонента на новый будет восстановлена исходная устойчивость к отказам.

Если рассматриваемое состояние отказа соответствует шаблону А или В, то имеется возможность определения периода, по истечении которого начинается износ. Задача запланированного восстановления и запланированного списания должна выполняться с интервалами длительностью меньше этого периода. Другими словами, частота выполнения задачи запланированного восстановления или запланированного списания определяется длительностью периода, по истечении которого начинает наблюдаться резкий рост вероятности отказа элемента или компонента.

В случае соответствия шаблону С необходимо использовать более сложные методики анализа. Рассмотрение этих методик выходит за рамки настоящего руководства. Следует отметить, что существует два типа границ срока службы, от которых зависят задачи запланированного восстановления и запланированного списания. Это предельный безопасный срок службы и экономически обоснованный срок службы.

13.2.1 ПРЕДЕЛЬНЫЙ БЕЗОПАСНЫЙ СРОК СЛУЖБЫ — предельный безопасный срок службы относится только к состояниям отказа, влияющим на безопасность или на окружающую среду, поэтому результатом выполнения соответствующих задач должно быть снижение вероятности отказа до приемлемого уровня до окончания срока службы. (Метод определения приемлемого уровня описан в разделе 12.1.3 настоящего руководства. На практике обычно используются вероятности порядка 10^{-6} , а в отдельных случаях — 10^{-9}). Это требование означает, что предельный безопасный срок службы не может применяться к состояниям отказа, вероятность которых достаточно высока уже при вводе элемента в эксплуатацию.

В идеальном случае предельный безопасный срок службы определяется до ввода нового элемента в эксплуатацию. Его определение производится путем испытания статистически достаточного образцового набора элементов в смоделированной рабочей среде, в результате которого определяется фактически достигнутая продолжительность жизненного цикла. В ряде отраслей промышленности используется небольшая часть предельного безопасного срока службы (обычно треть или четверть), см. рис. 14.

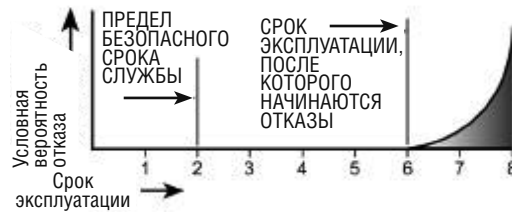


РИС. 14 ПРЕДЕЛЫ БЕЗОПАСНОГО СРОКА СЛУЖБЫ

13.2.2 ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ СРОК СЛУЖБЫ — в ряде случаев опыт эксплуатации показывает, что запланированное восстановление или запланированное списание элемента целесообразно выполнить с экономической точки зрения. Определенный таким образом срок службы называется экономически обоснованным. Он базируется не на доле срока службы, по истечении которой возрастает условная вероятность отказа, а на фактической взаимосвязи срока эксплуатации и надежности элемента. Для оценки задачи с экономической точки зрения достаточное число элементов должно нормально функционировать до истечения экономически обоснованного срока службы.

13.3 Задачи поиска отказов — “Любая выбранная задача поиска отказов должна соответствовать следующим дополнительным критериям: (поиск отказов неприменим к состояниям очевидного отказа):

- a. Критерии, на основе которых выбирается интервал выполнения данной задачи, должны включать в себя необходимость снижения вероятности множественного отказа в соответствующей защищаемой системе до уровня, приемлемого для владельца или пользователя объекта.
- b. Результатом выполнения задачи должно быть подтверждение того, что все компоненты, подпадающие под анализ на состояние отказа, являются работоспособными.
- c. В задаче поиска отказов и соответствующем процессе выбора интервала должна учитываться любая вероятность того, что некая скрытая функция может остаться в состоянии отказа даже после выполнения задачи.
- d. Должно быть физически возможным регулярное выполнение задачи с заданными интервалами.” (SAE JA1011, раздел 5.7.5)

13.3.1 МНОЖЕСТВЕННЫЕ ОТКАЗЫ И ПОИСК ОТКАЗОВ — как указано в разделе 10.1.1.2, множественный отказ происходит в том случае, если защищенная функция отказывает в период отказа самой защиты. Это явление представлено на рис. 5. Формула 1, ниже приведенная повторно как формула 3, описывает способ расчета вероятности множественного отказа.

$$\text{Вероятность множественного отказа} = \text{вероятность отказа защищенной функции} \times \text{средняя недоступность защиты} \quad (\text{ФОРМУЛА 3})$$

Вывод: вероятность множественного отказа можно снизить путем снижения недоступности защиты — другими словами, путем повышения ее доступности.

Оптимальным способом является предотвращение отказа функции защиты путем применения некоторого типа профилактического обслуживания. С другой стороны, при работе со скрытыми отказами лишь небольшая часть профилактических задач соответствует критериям возможности технической реализации. Тем не менее, несмотря на то, что профилактическое обслуживание часто не является целесообразным, очень важно принимать меры для снижения возможности множественного отказа до требуемого уровня. Эти меры могут включать в себя периодическую проверку на наличие скрытых отказов. Такие проверки называются задачами поиска отказов.

13.3.2 ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОИСКА ОТКАЗОВ — целью поиска отказов является выяснение того, привел ли скрытый отказ или сочетание скрытых отказов к неспособности защитной функции обеспечить требуемую защиту при ее последующем вызове. (Поэтому задачи поиска отказов часто называются функциональными проверками). В дальнейших разделах рассматриваются некоторые ключевые вопросы в этой сфере.

13.3.2.1 Полная проверка защитной функции — задача поиска отказов должна гарантировать обнаружение всех отказов, для обнаружения которых она предназначена. Это очень важно, в частности, для сложных устройств, включающих в себя датчики, электрические схемы, приводы. В идеальном случае эта задача выполняется путем моделирования условий, которые должны обнаруживаться датчиком, и проверки наличия правильной реакции привода. Кроме того, необходимо назначить соответствующую периодичность поиска отказов.

13.3.2.2 Не нарушать работу — разборка любого объекта всегда несет с собой риск того, что последующая сборка может быть произведена неправильно. Если такая ситуация возникнет с защитным устройством, подверженным скрытым отказам, то, ввиду скрытого характера отказа, о состоянии отказа не станет известно до следующей проверки (или потребности в этом устройстве). Поэтому для каждого случая необходимо находить способы проверки функционирования защитных устройств без их отключения или другого нарушения их рабочего режима.

Несмотря на вышесказанное, для проверки правильности работы некоторых устройств требуется разборка или полный демонтаж. В таких случаях при выполнении описываемой задачи необходимо соблюдать особую осторожность, и обеспечить нормальную работу устройства после возвращения его в эксплуатацию.

13.3.2.3 Физическая возможность проверки функционирования — в немногих, но существенных случаях, выполнить задачу поиска отказов принципиально невозможно. Это, в частности, следующие ситуации:

- a. Невозможно получить доступ к защитному устройству для проверки его функционирования (как правило, из-за неудачной конструкции).
- b. Функционирование устройства (такого, как плавкий предохранитель или разрывной диск) невозможно проверить без его повреждения. В большинстве таких случаев можно использовать устройство на основе другой технологии (например, прерыватель цепи вместо предохранителя). В единичных случаях последним выходом является устранение рисков, связанных с защитой без возможности проверки, другим путем, до появления более подходящего решения, или прекращение рассматриваемых процессов.

13.3.2.4 Минимизация рисков при выполнении задачи — задача поиска отказов должна выполняться без значительного повышения риска множественных отказов. Если для выполнения задачи поиска отказов защитное устройство необходимо выключить, или после проверки этого устройства выяснилось, что оно отказало, то необходимо обеспечить альтернативную защиту или прекратить использование защищенной функции до восстановления защиты.

13.3.2.5 Периодичность должна быть практически обоснованной — выполнение задачи поиска отказов с требуемой периодичностью должно быть практичным. Этот вопрос рассмотрен в разделе 13.3.3. Перед тем, как оценивать практичность требуемого интервала, необходимо определить этот требуемый интервал.

13.3.3 ИНТЕРВАЛЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА ОТКАЗОВ

13.3.3.1 Интервалы поиска отказов, доступность и надежность — при расчете интервалов поиска отказов используется не один, а два фактора — доступность и надежность. Можно показать, что существует линейная взаимосвязь между недоступностью, интервалом поиска отказов и надежностью защитной функции, выраженной в MTBF (среднее время наработки на отказ) — см. формулу 4:

$$\text{Недоступность} = \frac{0,5 \text{ Интервал поиска отказов}}{\text{MTBF защитной функции}} \quad (\text{ФОРМУЛА 4})$$

Кроме того, можно показать, что эта линейная взаимосвязь верна для любой недоступности менее 5%, при условии, что защитная функция соответствует экспоненциальному распределению.¹

13.3.3.2 *Исключение времени выполнения задачи и времени ремонта* — параметр «недоступность» защитной функции в формуле 4 не включает в себя недоступность, возникающую при выполнении задачи поиска отказов, а также недоступность, вызванную необходимостью восстановления функции в случае обнаружения ее отказа. Причины этого следующие:

- a. Недоступность, обусловленная выполнением задачи поиска отказов и любого ремонта, как правило, настолько мала по сравнению с потенциальной недоступностью между задачами, что порядок этой разницы позволяет пренебречь ею с математической точки зрения.
- b. Задача поиска отказов и любой необходимый ремонт должны выполняться в строго определенных условиях. Эти условия предусматривают резкое снижение вероятности множественного отказа в процессе обслуживания, вплоть до полного ее устранения. При этом подразумевается прекращение работы защищаемой системы или организация альтернативной защиты до полного восстановления системы. Если эти операции выполняются правильно, то при расчете вероятности множественного отказа можно не учитывать недоступность, возникающую в процессе (контролируемого) вмешательства при обслуживании.

В процессе определения RCM последний аспект учитывается в критерии того, есть ли необходимость в выполнении задачи поиска отказов. Если в процессе выполнения задачи существенно повышается вероятность множественного отказа, то ответ на вопрос «Снижает ли данная задача вероятность множественного отказа до приемлемого уровня» будет отрицательным.

13.3.3.3 *Расчет интервала поиска отказов (FFI) на основе только доступности и надежности* — если применить сокращение “FFI” для обозначения интервала поиска отказов и сокращение “MTIVE” для описания MTBF защитной функции, тогда формулу 4 можно преобразовать в формулу 5:

$$FFI = 2 \times \text{Недоступность} \times \text{Mtive} \quad (\text{ФОРМУЛА 5})$$

Это означает, что для определения интервала поиска отказов для одиночной защитной функции необходимо знать ее среднее время наработки на отказ и требуемую доступность функции (на основе которой можно рассчитать недоступность, используемую в этой формуле). Для более удобного анализа без использования формул можно составить простую таблицу на основе формулы 5, показанную на рис. 15:

| | | | | | | | |
|--|---------|---------|--------|--------|------|------|------|
| Необходимая доступность защитной функции | 99,99 % | 99,95 % | 99,9 % | 99,5 % | 99 % | 98 % | 95 % |
| Интервал поиска отказов (в % от MTBF) | 0.02 % | 0.1 % | 0.2 % | 1 % | 2 % | 4 % | 10 % |

РИС. 15 ПОИСК ОТКАЗОВ: ИНТЕРВАЛ, ДОСТУПНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ

13.3.3.4 *Методы точного расчета FFI* — на основе сочетания формул 1 и 5 можно составить единую формулу для определения интервалов поиска отказов, которая будет включать в себя все рассматриваемые переменные (см. следующие разделы). Для этого определим дополнительные термины:

- a. Возможность множественного отказа 1 к 1 000 000 в год дает среднее время между множественными отказами, равное 1 000 000 лет. Обозначим эту величину как M_{MF} , тогда вероятность множественного отказа в любом году будет равна $1/M_{MF}$.
- b. Если частота потребности в применении защищенной функции составляет (к примеру) один раз за 200 лет, то вероятность отказа защищенной функции будет равна 1 к 200 в любом году; соответственно, среднее время наработки на отказ для защищенной функции составит 200 лет. Обозначим эту величину как M_{TED} , тогда вероятность отказа защищенной функции в любом году будет равна $1/M_{TED}$. Эта величина также называется частотой потребности.
- c. Величина M_{TIVE} представляет собой среднее время наработки на отказ для защитной функции, а FFI — интервал выполнения задачи поиска отказов.

d. Величина U_{TIVE} представляет собой допустимую недоступность защитной функции.

Если подставить эти величины в вышеприведенные формулы, формула 5 примет следующий вид:

$$1 / M_{MF} = (1 / M_{TED}) \times U_{TIVE} \quad (\text{ФОРМУЛА 6})$$

Ее можно преобразовать следующим образом (формула 7):

$$U_{TIVE} = M_{TED} / M_{MF} \quad (\text{ФОРМУЛА 7})$$

Подстановка величины U_{TIVE} из формулы 7 в формулу 5 дает следующее (формула 8):

$$FFI = (2 \times M_{TIVE} \times M_{TED}) / M_{MF} \quad (\text{ФОРМУЛА 8})$$

Эта формула позволяет за один шаг определить интервал поиска отказов для одиночной независимой функции защиты.

13.3.3.4.1 Состояния множественного отказа одиночной функции защиты — все вероятности отказа, способные привести к отказу функции защиты, сгруппированы в этом разделе в одно состояние отказа (“отказ резервного насоса”). Большую часть защитных функций можно проанализировать таким образом, поскольку любые состояния отказа, способные привести к отказу защитной функции, проходят проверку при проверке функционирования всего устройства.

С другой стороны, в ряде случаев целесообразно выполнять подробный анализ характера и последствий отказов (FMEA) в отношении защитной функции, с целью определения отдельных состояний отказа, каждое из которых само по себе может привести к неспособности защитного устройства или системы обеспечить необходимую защиту. Обычно такой анализ выполняется в следующих двух наборах условий:

- a. Известно, что одни состояния отказа успешно устраняются при условном техобслуживании или выполнении задач запланированного восстановления или запланированного списания, в то время как другие являются непредсказуемыми и неустраняемыми. В таких случаях необходимо применить соответствующие операции условного обслуживания или задачи запланированного восстановления или запланированного списания к соответствующим состояниям отказа, и выполнить поиск отказов в отношении остальных состояний отказа.
- b. Используется новое защитное устройство, и все имеющиеся данные об отказах (доступные в банках данных, от поставщиков компонентов и из других источников) применимы только к отдельным частям устройства, но не ко всему устройству в целом.

В этом случае в формуле 8 следует учесть соответствующую комбинацию сочетания отдельных режимов отказа, являющихся объектом задачи поиска отказов, путем определения общего среднего времени наработки на отказ для защитной функции на основе параметров MTBF каждого отказа.

13.3.3.4.2 Метод расчета интервалов поиска отказов для других типов защитных функций — описанные выше методики определения интервалов поиска отказов основаны на анализе рисков для одиночных функций защиты. Управление множеством защитных функций, а также управление множественными отказами, влекущими только экономические негативные последствия, выходит за рамки настоящего руководства.

13.3.3.5 *Практичность интервалов поиска отказов* — описанные методы расчета интервалов поиска отказов иногда приводят к получению очень коротких или очень длинных интервалов, со следующими недостатками:

- a. Очень короткий интервал поиска отказов имеет два основных недостатка:
 1. В ряде случаев малая длительность интервала просто непрактична. Например, выполнение задачи поиска отказов может приводить каждый раз к остановке важного узла на обрабатывающем предприятии через определенные интервалы.
 2. Выполнение задачи может привести к привыканию (подобно привыканию при слишком частом тестировании пожарной сигнализации).

В этих случаях следует отказаться от предложенного варианта задачи и найти другой способ снижения вероятности множественного отказа до приемлемого уровня.

- b. Очень длинный интервал поиска отказов также имеет два основных недостатка:
 - 1. Для интервалов, значительно более длительных по сравнению с прогнозируемым остаточным полезным сроком службы объекта: использование таких интервалов подразумевает, что необходимость в выполнении запланированной задачи поиска отказов отсутствует вообще (при этом, тем не менее, необходимо проверять правильность установки устройств при вводе в эксплуатацию).
 - 2. Для интервалов с длительностью больше максимального горизонта планирования существующих систем планирования техобслуживания, но меньше прогнозируемого остаточного полезного срока службы объекта: в таких случаях необходимо соблюдать осторожность и не уменьшать длительность таких интервалов просто до пределов обзора существующих систем планирования, по крайней мере потому, что выполнение задач поиска отказов иногда само по себе способно привести к появлению отслеживаемых ими отказов.
- c. Следует отметить, что может быть получен интервал выполнения задачи поиска отказов, длительность которого будет превышать средний интервал между отказами защищенной функции. С ростом величины, на которую интервал поиска отказов превышает интервал отказов, показатель обнаружения отказов резко падает вплоть до уровня, ниже которого обнаружение отказов почти или совсем перестает влиять на вероятность множественного отказа. Если при расчете по какой-либо из вышеприведенных формул будет получен интервал, равный или превышающий эту величину, то потребуются найти другой способ снижения вероятности множественного отказа до приемлемого уровня.

13.4 Комбинация задач — если состояние отказа или множественный отказ может привести к негативному влиянию на окружающую среду, и невозможно определить одиночную задачу, снижающую риск отказа до приемлемого уровня, в некоторых случаях можно добиться необходимого снижения этого риска путем использования комбинации задач (обычно относящихся к различным категориям, например, задача, выполняемая по условию, и задача запланированного списания).

При рассмотрении таких комбинаций следует соблюдать осторожность и обеспечить соответствие каждой задачи критериям возможности технической реализации для данного типа задач, и выполнение каждой задачи с соответствующей ей частотой. Кроме того, необходимо убедиться, что комбинация двух задач действительно приведет к уменьшению возможных последствий до приемлемого уровня. При этом следует учесть, что ситуации, в которых требуется выполнять две такие задачи, встречаются достаточно редко, и такой вариант не следует использовать без явной необходимости.

14. Политики управления отказами — единовременные изменения и эксплуатация до отказа

14.1 Единовременные изменения — “Процесс RCM должен быть направлен на реализацию требуемой производительности системы в ее текущей конфигурации и режиме эксплуатации путем применения соответствующих запланированных задач”. (SAE JA1011, раздел 5.8.1.1)

«В тех случаях, когда подобрать такие задачи не удастся, может потребоваться единовременное внесение изменений в объект или систему на основе следующих критериев:

- a. Если отказ является скрытым, и соответствующий множественный отказ влечет за собой негативные последствия для безопасности или окружающей среды, потребуется вынужденное единовременное изменение, снижающее вероятность множественного отказа до уровня, приемлемого для владельца или пользователя объекта.
- b. Если отказ очевиден и влечет за собой негативные последствия для безопасности или окружающей среды, потребуется вынужденное единовременное изменение, снижающее вероятность множественного отказа до уровня, приемлемого для владельца или пользователя объекта.
- c. Если отказ является скрытым, и соответствующий множественный отказ не влечет за собой негативные последствия для безопасности или окружающей среды, то внесение единовременного изменения должно быть экономически эффективным с точки зрения владельца или пользователя объекта.
- d. Если отказ очевиден и не влечет за собой негативные последствия для безопасности или окружающей среды, то внесение единовременного изменения должно быть экономически эффективным с точки зрения владельца или пользователя объекта». (SAE JA1011, раздел 5.8.1.2)

В предыдущих разделах настоящего руководства было отмечено, что исходная мощность (или характерная мощность) любого объекта определяется его конструкцией и методикой его изготовления, и техобслуживание не должно приводить к падению надежности ниже уровня, обусловленного конструкцией объекта. Из этого вытекают два следствия.

Во-первых, если исходная мощность объекта превышает требуемую производительность, то техобслуживание может упростить достижение требуемой производительности. Большинство оборудования достаточно корректно описано, разработано и изготовлено, поэтому для него, как правило, возможно построить соответствующую программу техобслуживания, как описано выше. Другими словами, в большинстве случаев RCM позволяет достичь требуемой производительности объекта в существующей конфигурации.

Во-вторых, если требуемая производительность превышает исходную мощность, то техобслуживание в любом объеме не приведет к получению требуемой производительности. В этом случае «лучшее» техобслуживание не позволит решить проблему, и потребуются найти решения, отличные от техобслуживания. Как правило, при этом изменяется мощность одного из трех элементов системы:

- a. Изменение физической конфигурации объекта (обычно называемое “модернизацией” или “модификацией”). Под ним понимается любое действие, приводящее к изменениям в чертежах или списке компонентов. Это может быть изменение спецификации компонента, добавление нового элемента, замена всей установки на установку другой конструкции или типа, изменение расположения установки. (Следует отметить, что в случае внесения таких изменений необходимо полностью выполнить процесс RCM в отношении новой конструкции, для проверки того, что она будет продолжать функционировать так, как требуется).
- b. Изменение процесса или процедуры, влияющее на эксплуатацию объекта.
- c. Изменение производительности одного или нескольких сотрудников, участвующих в управлении или техобслуживании оборудования (обычно при этом проводится обучение соответствующего сотрудника, рассматриваемое как метод обработки конкретного состояния отказа).

В настоящем руководстве к таким модификациям применяется термин “единовременное изменение”, поскольку в любой рассматриваемой системе они производятся однократно, в отличие от запланированных задач, выполняемых регулярно с определенными интервалами. В дальнейших разделах описаны конкретные цели единовременных изменений для каждой из основных категорий последствий отказов.

14.1.1 ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ — если состояние отказа может оказать негативное влияние на безопасность или окружающую среду, и не удастся подобрать запланированную задачу или комбинацию задач, снижающую риск отказа до приемлемого уровня, необходимо внести определенные изменения, поскольку в этом случае рассматривается угроза для безопасности или окружающей среды, которую невозможно должным образом предотвратить. В этих случаях обычно производится модернизация с одной или двумя целями:

- a. Снижение вероятности непредвиденного отказа до приемлемого уровня. Обычно оно достигается либо заменой соответствующего компонента на более мощный или более надежный, либо обеспечением предсказания отказа.
- b. Изменение элемента или процесса таким образом, что отказ перестает нести за собой негативные последствия для безопасности или окружающей среды. Обычно это достигается путем установки соответствующего защитного устройства. Следует учесть, что при добавлении такого устройства необходимо проанализировать его потребности в техобслуживании.

Кроме того, негативные последствия для безопасности или окружающей среды могут быть уменьшены путем исключения из процесса опасных материалов или полного прекращения использования процесса. По существу, если уровень риска, связанного с любым состоянием отказа, считается неприемлемым, то, согласно RCM, необходимо либо предотвратить отказ, либо обеспечить безопасность процесса. В противном случае придется принять условия, заведомо небезопасные или опасные для окружающей среды. В большинстве отраслей промышленности это недопустимо.

14.1.2 СКРЫТЫЕ ОТКАЗЫ — в случае скрытых отказов можно снизить риск множественного отказа путем внесения следующих изменений:

- a. Преобразование скрытого отказа в открытый путем использования дополнительного устройства: Некоторые скрытые отказы можно выявить с помощью дополнительного устройства (такого, как BITE — “Built-In Test Equipment” (Встроенное тестовое оборудование)), которое оповещает оператора о наличии скрытого отказа. Этот вариант необходимо использовать с осторожностью, поскольку возможные отказы добавленных функций также могут быть скрытыми. Если будет добавлено слишком много уровней защиты, то определение оптимальных задач поиска отказов будет существенно затруднено или невозможно. Более эффективный подход предполагает замену скрытой функции на явную функцию (см. следующий раздел).

- b. Применение функции защиты, отказ которой будет очевиден, вместо скрытой функции: В большинстве случаев это означает замену устройства или системы, отказ которых незаметен, на устройство или систему, отказ которой гарантированно очевиден.
- c. Замена существующего защитного устройства на более надежное, но также скрытое устройство. Более надежное устройство (т.е. устройство, имеющее большее время наработки на отказ) позволяет организации достигнуть одной из трех следующих целей:
 - 1. Снижение вероятности множественного отказа без изменения интервалов выполнения задачи поиска отказов. При этом повышается уровень защиты.
 - 2. Увеличение интервала выполнения задач без изменения вероятности множественного отказа. При этом снижается потребность в ресурсах.
 - 3. Снижение вероятности множественного отказа и увеличение интервалов выполнения задачи.
- d. Дублирование скрытой функции. Если невозможно подобрать одиночное защитное устройство с достаточно высоким MTBF для реализации требуемого уровня защиты, любую из перечисленных выше целей можно реализовать путем двукратного или трехкратного резервирования скрытой функции. С другой стороны, следует учесть, что функционирование всех этих устройств также необходимо проанализировать для разработки соответствующей политики управления отказами.
- e. Обеспечение возможности выполнения запланированной задачи (например, путем оптимизации доступа к защитному устройству или системе).
- f. Снижение частоты потребности в защищенной функции. В зависимости от конкретных состояний отказа, приводящих к необходимости применения защиты, необходимо изменить физическую конфигурацию системы и/или «мощность» оператора или специалиста поддержки соответствующим образом для снижения частоты потребности системы в применении защиты.

14.1.3 ОПЕРАТИВНЫЕ И НЕОПЕРАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ — для некоторых состояний отказа с оперативными и неоперативными последствиями наиболее экономически эффективной политикой будет замена системы, позволяющая снизить общие затраты. Для этого изменения должны быть направлены на следующее:

- a. Снижение количества событий отказа или их полное устранение, путем повышения устойчивости или надежности определенного элемента системы.
- b. Сокращение или устранение последствий отказа (например, реализация перехода в дежурный режим).
- c. Обеспечение экономической эффективности запланированной задачи (например, путем оптимизации доступа к компоненту).

Следует отметить, что в этом случае вносимые модификации должны быть обоснованы экономически, т.е. они должны быть вынужденными, и должен отсутствовать другой способ снижения риска отказов, имеющих негативные последствия для безопасности или окружающей среды, до приемлемого уровня.

14.2 Работа до отказа — “Выбранная политика работы до отказа должна отвечать следующим критериям:

- a. Если отказ является скрытым, и связанной с ним запланированной задачи не предусмотрено, то соответствующий множественный отказ не должен иметь негативных последствий для безопасности или окружающей среды.
- b. Если отказ очевиден, и связанной с ним запланированной задачи не предусмотрено, то соответствующее состояние отказа не должно иметь негативных последствий для безопасности или окружающей среды. (SAE JA1011, раздел 5.8.2)

Если имеется некоторое число очевидных отказов, не несущих негативное влияние на окружающую среду, или скрытых отказов, также не несущих негативное влияние на окружающую среду, то наиболее экономически эффективной политикой управления отказами может оказаться принятие мер к их устранению по мере их появления. Другими словами, политика “работы до отказа” допустима при следующих условиях:

- a. Для скрытого отказа не удастся подобрать подходящую запланированную задачу, и соответствующий множественный отказ не несет негативных последствий для безопасности или окружающей среды.
- b. Не удастся подобрать экономически эффективную задачу по предотвращению отказов с оперативными или неоперативными последствиями.

15. Выбор политики управления отказами

15.1 Два подхода — последние три проблемы процесса RCM, рассматриваемые в разделах с 10 по 14 этого руководства, включают в себя выбор подходящих политик управления отказами для каждого режима отказа, определенного в FMEA. Для выбора политик управления отказами можно использовать два разных подхода. Это строгий подход и подход с использованием диаграммы принятия решения.

Строгий подход является более комплексным и позволяет создать полностью оптимизированную по затратам стратегию управления отказами для всех режимов отказа, определенных в FMEA. Диаграммы принятия решения более популярны, поскольку их можно применить быстрее и дешевле, чем строгий подход. Однако подход с использованием диаграммы принятия решения должен полностью учитывать последствия для безопасности и окружающей среды, связанные с каждым режимом ошибки. Также необходимо иметь в виду, что при использовании диаграмм принятия решения для процесса выбора политики управления отказами отсутствует элемент субоптимизации с точки зрения затрат.

Обратите внимание, что при применении любого из подходов большинство решений приходится применять в условиях неполноты данных. Это может привести к соблазну полностью положиться на «логику по умолчанию», при которой при недоступности полных данных решения принимаются автоматически. Однако применение такой логики может привести к принятию неверных решений, особенно при оценке последствий. На практике следует исходить из того, что если возможные последствия высокой степени неопределенности оказываются недопустимыми, то необходимо предпринять усилия для изменения последствий режима отказа, а не полагаться на решения «по умолчанию».

15.2 Строгий подход — при использовании строгого подхода к выбору политики управления отказами пользователи должны для каждого режима отказа оценить экономические последствия, а также последствия для безопасности/окружающей среды, рассмотреть все технически оправданные варианты политики обработки отказов, которые можно применить к каждому режиму отказа, а также выбрать политику управления отказами, которая наиболее эффективно позволяет справиться с экономическими последствиями, а также с последствиями для безопасности/окружающей среды. Этот подход применяется на следующих этапах:

- a. Отдельные явные отказы, которые являются результатом скрытых отказов.
- b. Для каждого явного отказа:
 1. Определите фактическую вероятность того, что режим отказа может привести к травме или смерти.
 2. Определите допустимую вероятность того, что режим отказа может привести к травме или смерти.
 3. Определите фактическую вероятность того, что режим отказа может привести к нарушению экологических стандартов или нормативов.
 4. Определите допустимую вероятность того, что режим отказа может привести к нарушению экологических стандартов или нормативов.
 5. Установите совокупные эксплуатационные и неэксплуатационные последствия режима отказа.
 6. В случае режимов отказа, в которых возможны последствия для безопасности и окружающей среды и для которых фактическая вероятность возникновения этих последствий превышает допустимую вероятность, определите все политики управления отказами, которые позволяют снизить вероятность до допустимого уровня.
 7. Определите все политики управления отказами (если таковые существуют), затраты на которые будут меньше экономических последствий режима отказа при измерении за соответствующий период времени.
 8. Выберите политику управления отказами, которая наиболее рентабельно позволяет устранить экономические последствия режима отказа, а также последствия для безопасности/окружающей среды.
- b. Для каждого скрытого отказа:
 1. Определите фактическую вероятность того, что связанный множественный отказ может привести к травме или смерти.
 2. Определите допустимую вероятность того, что множественный отказ может привести к травме или смерти.
 3. Определите фактическую вероятность того, что множественный отказ может привести к нарушению экологических стандартов или нормативов.
 4. Определите допустимую вероятность того, что множественный отказ может привести к нарушению экологических стандартов или нормативов.
 5. Установите совокупные эксплуатационные и неэксплуатационные последствия режима отказа и связанного множественного отказа.

6. В случае множественных отказов, в которых возможны последствия для безопасности и окружающей среды и для которых фактическая вероятность возникновения этих последствий превышает допустимую вероятность, определите все политики управления отказами, которые позволят снизить вероятность множественного отказа до допустимого уровня.
7. Определите все политики управления отказами (если таковые существуют), затраты на которые будут меньше совокупных экономических последствий режима отказа и множественного отказа при измерении за соответствующий период времени.
8. Выберите политику управления отказами, которая наиболее рентабельно позволяет устранить экономические последствия режима отказа и множественного отказа, а также последствия для безопасности/окружающей среды.

15.3 Подходы с использованием диаграммы принятия решения — все подходы к RCM с использованием диаграммы принятия решения, которые соответствуют SAE JA1011, основаны на предположении, что последствия для безопасности/окружающей среды рассматриваются для экономических последствий. Другое предположение, встроенное в большинство этих диаграмм, заключается в том, что некоторые категории политик управления отказами почти всегда более рентабельны, чем другие.

Эти два предположения используются для создания иерархий, при этом пользователям предлагается выбрать политику управления отказами из первой категории иерархии, которая считается технически оправданной и оптимальной. Ключевые предположения, которые делаются при создании таких иерархий, обсуждаются ниже.

ПРИМЕЧАНИЕ. В этом разделе термин «отказ» означает режим отказа или множественный отказ.

15.3.1 ИЕРАРХИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ — во всех допустимых подходах к RCM с использованием диаграммы принятия решения предполагается, что если политика управления отказами позволяет удовлетворительно справиться с отказом, имеющим последствия для безопасности или окружающей среды, то она будет удовлетворительно справляться и с экономическими (эксплуатационными и неэксплуатационными) последствиями этого отказа. В большинстве случаев это предположение допустимо, однако оно справедливо не всегда.

В результате этого предположения допустимые диаграммы принятия решения RCM строятся таким образом, что, если последствия отказа для безопасности или окружающей среды считаются неприемлемыми, то пользователи вынуждены искать политику управления отказами, которая позволит снизить последствия для безопасности/окружающей среды до допустимого уровня без учета экономических последствий отказа. Этот подход по сути своей консервативен, поскольку он обеспечивает соответствующее решение проблемы последствий для безопасности и окружающей среды для любых отказов. В результате он приводит к созданию безопасной и экологически обоснованной программы технического обслуживания, содержащей небольшое число политик управления отказами, которые являются более дорогостоящими, чем следует.

15.3.2 ИЕРАРХИЯ ПОЛИТИК — в большинство диаграмм принятия решения RCM встроены два ключевых предположения. Первое предположение заключается в том, что некоторые категории политик управления отказами более рентабельны, чем другие. Второе предположение заключается в том, что некоторые из них более консервативны, чем другие. Если в диаграмме принятия решения для выбора политики используется иерархический подход, эти предположения наиболее точно иллюстрируются с помощью следующих иерархий:

- a. Для явных режимов отказа, которые могут повлиять на безопасность или окружающую среду, политики управления отказами рассматриваются в следующем порядке: задачи по состоянию, задачи запланированного восстановления/списания, сочетание задач (обычно задач по состоянию и задач запланированного списания), одновременные изменения.
- b. Для явных режимов отказа, которые не могут повлиять на безопасность или окружающую среду, политики управления отказами рассматриваются в следующем порядке: задачи по состоянию, задачи запланированного восстановления/списания, внеплановое обслуживание, одновременные изменения.
- c. Для скрытых режимов отказа, в которых множественные сбои могут повлиять на безопасность или окружающую среду, политики управления отказами рассматриваются в следующем порядке: задачи по состоянию, задачи запланированного восстановления/списания, поиск отказов, сочетание задач (обычно поиска отказов и запланированного списания), одновременные изменения.
- d. Для скрытых режимов отказа, в которых множественные отказы не могут повлиять на безопасность или окружающую среду, политики управления отказами рассматриваются в следующем порядке: задачи по состоянию, задачи запланированного восстановления/списания, поиск отказов, внеплановое обслуживание, одновременные изменения.

Причины, по которым политики управления отказами рассматриваются в этом порядке, обсуждаются ниже.

15.3.2.1 Задачи по состоянию — задачи по состоянию рассматриваются в процессе выбора задач первыми по следующим причинам.

- a. Их почти всегда можно выполнить, не перемещая основные фонды из места установки и обычно не останавливая их работу, поэтому они редко влияют на работу.
- b. Их обычно проще организовать.
- c. Они позволяют выявить определенные потенциальные условия отказа, поэтому корректирующие действия можно явно определить до начала работы. Это позволяет снизить объем выполняемых ремонтных работ и провести их более быстро.
- d. В результате выявления оборудования в состоянии потенциального отказа они обеспечивают его работоспособность на протяжении практически всего полезного срока службы.

15.3.2.2 Задачи запланированного восстановления и запланированного списания — если для определенного отказа не удалось найти подходящую задачу по состоянию, далее следует выбрать задачу запланированного восстановления или запланированного списания. Запланированное восстановление и запланированное списание имеют следующие недостатки:

- a. Почти во всех ситуациях их можно выполнить только после остановки элементов и (обычно) передачи их в мастерскую, поэтому эти задачи всегда так или иначе влияют на работу.
- b. Ко всем элементам применяются предельные сроки эксплуатации, поэтому многие элементы или компоненты, которые могли бы проработать дольше этого времени, удаляются.
- c. Задачи восстановления включают в себя выполнение работ в мастерской, поэтому они создают значительно большую рабочую нагрузку, чем задачи по состоянию.

Как было упомянуто в пункте 13.2 этого руководства, запланированное восстановление и запланированное списание обычно рассматриваются вместе, поскольку между этими задачами много общего. Когда сталкиваясь с этими задачами на практике, обычно бывает очевидно, следует ли применить к затронутому компоненту запланированное восстановление или запланированное списание. Однако в случае некоторых режимов отказа критериям технической обоснованности могут удовлетворять обе задачи. В этих случаях выбирают более рентабельную из двух задач.

15.3.2.3 Поиск отказа — успешно проведенное профилактическое обслуживание позволяет предотвратить отказы оборудования, а при выполнении поиска отказов мы допускаем, что оно будет некоторое время (хотя и не очень долго) находиться в состоянии отказа. Это означает, что профилактическое обслуживание является более консервативным (то есть более безопасным) подходом, чем поиск отказов, поэтому последний метод следует выбирать только при невозможности найти более эффективную задачу по предотвращению отказов. По этой причине диаграммы принятия решения RCM в процессе выбора задачи всегда должны помещать три категории задач по предотвращению отказов выше задачи поиска отказов.

15.3.2.4 Сочетание задач — вплоть до этого момента диаграммы принятия решения пытаются найти одну задачу, которая позволит должным образом справиться с последствиями рассматриваемого режима отказа. Однако, как упоминалось в пункте 13.4, иногда бывает невозможно найти одну задачу, которая позволяет снизить риск отказа до допустимо низкого уровня. Именно в этом случае может оказаться полезным поискать сочетание задач, как объясняется в пункте 13.4. Основным недостатком сочетания задач является тот факт, что они неизбежно оказываются более дорогими, чем отдельная задача.

15.3.2.5 Эксплуатация до отказа — при оценке эффективности задач по предотвращению отказа, предназначенных для действия в режиме отказа, имеющих экономические последствия, всегда выполняется сравнение стоимости задания и затрат, связанных с непредвиденным режимом отказа. В этих случаях задачи выбираются, только если они приводят к снижению общих затрат на отказ. При невозможности найти такую задачу отказ оказывается менее затратным чем упреждающее обслуживание, поэтому в качестве политики управления отказами выбирается эксплуатация до отказа, то есть мы позволяем отказу случиться. (Если затраты на режим отказа все же оказываются чрезмерными, то единственным решением будет реализовать однократное изменение, как обсуждалось ранее.) Как объяснено в пункте 14.2 этого руководства, эксплуатация до отказа не является допустимым вариантом в случае однократного отказа, а также для множественных отказов, которые имеют последствия для безопасности или окружающей среды.

15.3.2.6 *Однократные изменения* — надежность, проектирование и техническое обслуживание неразрывно связаны между собой. Это может привести к соблазну до рассмотрения требований к техническому обслуживанию внести однократные изменения в существующие системы (особенно выполнить модификацию оборудования). На самом деле все диаграммы принятия решения RCM учитывают техническое обслуживание до однократных изменений по следующим четырем причинам:

- a. Для большинства модификаций от концепции до ввода в эксплуатацию требуется от шести месяцев до трех лет в зависимости от затрат и сложности нового проекта. С другой стороны, дежурный специалист по техническому обслуживанию вынужден обслуживать оборудование, имеющееся на настоящий момент, а не то, каким оно должно быть или может стать в будущем. Поэтому до обдумывания будущих изменений конструкции необходимо справляться с существующей реальностью.
- b. У большинства организаций возникает множество возможностей улучшения конструкции, которые кажутся более предпочтительными, но которые не очень физически или экономически обоснованы. Фокусируя внимание на последствия отказа, процесс RCM не слишком полезен при разработке рационального набора приоритетов для таких проектов, особенно по причине того, что он отделяет жизненно важные аспекты от просто желательных. Совершенно очевидно, что такие приоритеты можно создать только после завершения анализа.
- c. Однократные изменения требуют больших затрат. Они вовлекают затраты на разработку новой идеи (проектирование нового станка, разработка новых рабочих процедур), затраты на превращение идеи в реальность (изготовление новой детали, приобретение нового станка, составление новой программы обучения), а также затраты на реализацию изменения (установка детали, проведение программы обучения). Дополнительные непрямые затраты возникают в случае, если на время реализации изменения необходимо прервать работу людей или оборудования.
- d. Существует опасность того, что изменение не приведет к устранению проблемы, которую оно призвано решить, или даже усугубит ее. В некоторых случаях оно может даже создать дополнительные проблемы.

По всем этим причинам подходы к RCM с использованием диаграмм принятия решения нацелены на получение требуемой производительности от системы в том виде, в котором она существует сейчас, а изменение конфигурации системы предлагается только на следующем этапе

15.3.3 ПРИМЕНЕНИЕ ПОДХОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ К RCM — по всему миру используется большое число разных диаграмм принятия решения RCM. Некоторые из них почти идеально соответствуют ранее изложенным принципам, а другие из них сильно расходятся с этими принципами (в некоторых случаях они вообще не соответствуют SAE JA1011). Некоторые диаграммы являются собственностью фирмы, а другие находятся в открытом доступе. По этим причинам в этом руководстве не рекомендована никакая конкретная диаграмма принятия решения. Однако исключительно для иллюстрации на рис. 16 и 17 приведены два примера диаграмм принятия решения, которые соответствуют принципам изложенным в пунктах 15.3.1 и 15.3.2. (Обратите внимание на комментарии в пункте 18.6 о необходимости обучения до использования каких-либо диаграмм принятия решения.)

Эти диаграммы принятия решения обычно применяются на трех следующих этапах:

- a. При работе сверху вниз используйте диаграмму принятия решения для определения категории последствий, применимую к рассматриваемому режиму отказа.
- b. При работе вниз по соответствующему столбцу последствий используйте критерий технической обоснованности, рассмотренный в разделах с 12 по 14 этого руководства, чтобы оценить техническую обоснованность возможных политик управления отказами в каждой категории.
- c. Выберите политику управления отказами из первой категории, удовлетворяющей критериям технической обоснованности. Эта политика должна эффективно справляться с последствиями рассматриваемого режима отказа.

Алгоритм принятия решения RSM

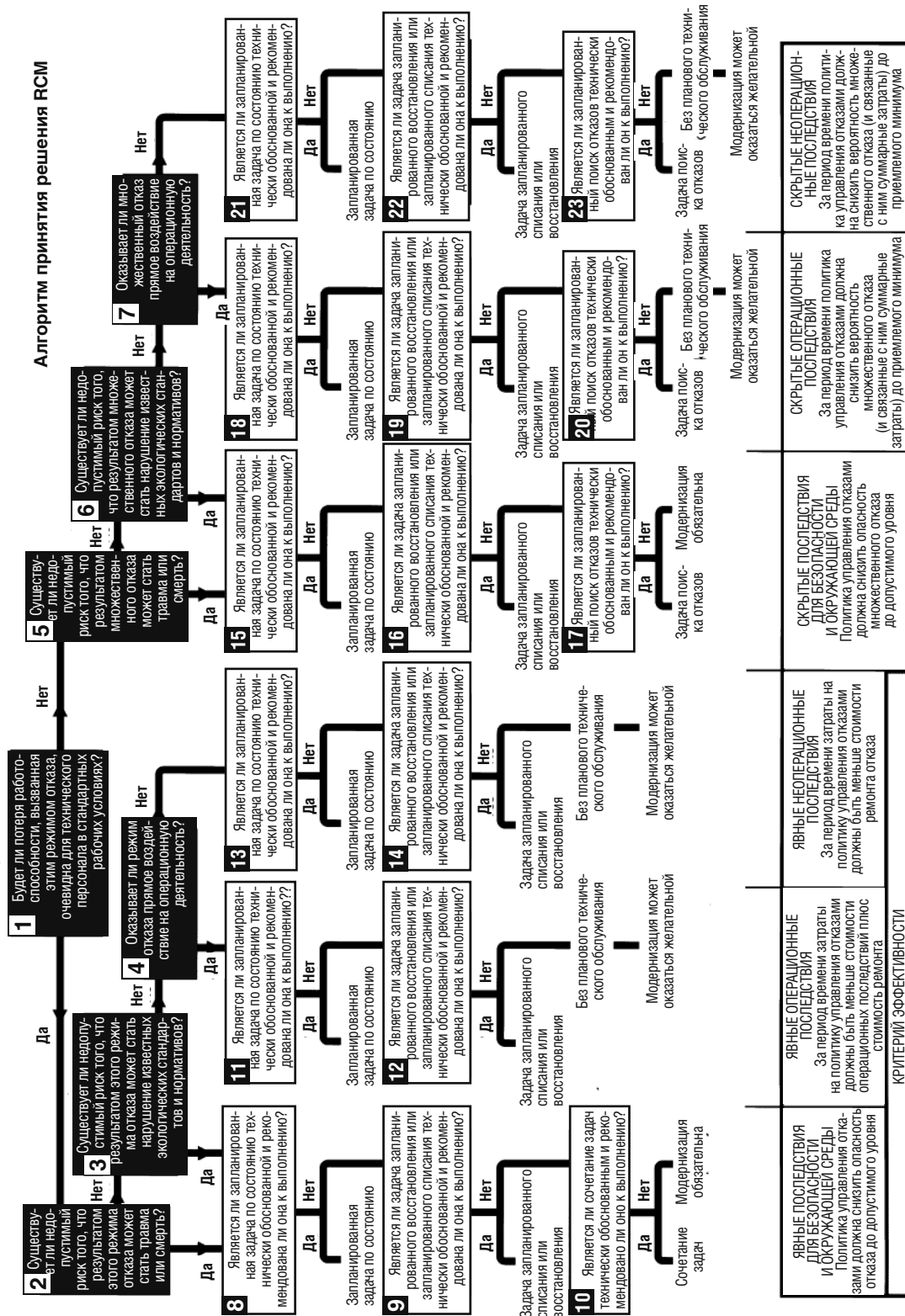


РИС. 16. ПРИМЕР ПЕРВОЙ ДИАГРАММЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

16. Возможности применения программы — «Настоящий документ составлен на основе следующих допущений: (а) большая часть данных, используемых в ходе начального анализа, не является точной; более точные данные будут доступны на следующих этапах; (b) направление использования основных фондов и связанные требования определенного уровня производительности также должны измениться с течением времени; (с) технологии технического обслуживания продолжают развиваться. По этой причине, если программа управления основными фондами на основе принципов RCM должна обеспечивать функционирование основных средств в полном соответствии с функциональными требованиями владельцев и пользователей, необходимо осуществлять периодические проверки». (SAE JA1011, раздел 5.9.1)

«Поэтому любой процесс RCM подразумевает периодические проверки как информации, используемой при принятии решений, так и самих решений. В ходе соответствующей проверки необходимо убедиться в том, что на все семь вопросов, приведенных в разделе 5 действительно даны удовлетворительные ответы, полученные в соответствии с критериями, изложенными в разделах 5.1-5.8 [документ SAE JA1011].» (SAE JA1011, раздел 5.9.2)

Чтобы удостовериться в том, что на семь вопросов, приведенных в документе SAE JA1011 «действительно даны удовлетворительные ответы, полученные в соответствии с критериями, изложенными» в документе, следует ответить на ряд конкретных вопросов, включая следующие:

- a. Эксплуатационные условия: менялись ли условия эксплуатации оборудования в значительной степени, достаточной для изменения записанной информации или решений, принятых в ходе начального анализа? (Пример: переход от эксплуатации в течении 5 дней одной сменой к эксплуатации в режиме 24 часа/7 дней в неделю или наоборот.)
- b. Требования к производительности: менялись ли требования к производительности в значительной степени, достаточной для пересмотра стандартов производительности, определенных в ходе начального анализа?
- c. Виды отказов: стало ли с момента проведения предыдущего анализа ясно, что какие-либо существующие виды отказов были зарегистрированы ошибочно и возникали ли непредвиденные виды отказов, которые необходимо зарегистрировать?
- d. Результаты отказов: существует ли информация, которую необходимо добавить или изменить в описании результатов отказов? (Этот вопрос относится главным образом к признакам отказа и прогнозированию времени простоя.)
- e. Последствия отказов: происходили ли события, заставившие прийти к выводу о том, что последствия отказов необходимо оценивать по отдельности? (Понятие «возможности» в данном случае включает в себя изменения экологических нормативов и корректировку представлений о допустимых уровнях риска.)
- f. Политики управления отказами: существуют ли основания полагать, что какая-либо политика управления отказами, выбранная на начальном этапе, более не является адекватной?
- g. Запланированные задачи: появилась ли у кого-либо из сотрудников информация о методах выполнения запланированных задач, являющихся более совершенными по сравнению с методами, выбранными ранее? (В большинстве случаев под выражением «совершенный» подразумевается «более экономичный», однако оно также может употребляться в значении «совершенный с технической точки зрения»).
- h. Интервалы выполнения задач: существуют ли доказательства того, что периодичность выполнения какой-либо задачи должна быть изменена?
- i. Выполнение задач: существуют ли основания полагать, что задача или задачи должны выполняться каким-либо сотрудником, отличным от сотрудника выбранного изначально?
- j. Модификации основных фондов: выполнялась ли модернизация основных фондов каким бы то ни было способом, расширяющим или сокращающим количество функций или видов отказов, либо изменяющим целесообразность применения любой из политик управления отказами? (Особое внимание следует уделить системам контроля и защиты.)

17. Математические и статистические формулы — «Любые математические и статистические формулы, используемые в ходе процесса (в особенности те, которые применяются для вычисления интервалов любых задач), должны быть логически надежными, а также доступными и утвержденными владельцем или пользователем основных фондов». (SAE JA1011, раздел 5.10.1)

В некоторых случаях, в частности для вычисления интервалов выполнения задач, в процессах RCM используются математические и статистические формулы. Так, например, в настоящем руководстве описаны математические формулы, которые можно применять при вычислении интервалов, в соответствии с которыми необходимо выполнять задачи поиска отказов. Это формулы, приведенные в разделе 13.3.3.3 и в разделе 13.3.3.4.

Кроме того, в ряде ситуаций доступны данные, позволяющие использовать различные математические формулы для обновления периодичности, с которой необходимо выполнять те или иные виды профилактических мероприятий.

Перед вводом в процесс RCM, соответствующий требованиям SAE JA1011, математических и статистических формул, аналогичных приведенным выше, они должны отвечать двум ключевым критериям: формулы должны быть надежными с логической точки зрения и доступными и утвержденными владельцем или пользователем основных средств.

17.1 Логическая надежность — формулы должны быть «логически надежными». Под этим подразумевается соответствие принципам функционирования оборудования и износа, лежащим в основе подхода RCM. В частности, это означает, что формулы не должны содержать неуместных предположений о схемах отказа, применяемых к отдельным видам отказов и способных оказать воздействие на рассматриваемое основное средство, или о связях между переменными, например, возрастом, средней наработкой на отказ и интервалами P-F.

17.2 Доступность для владельца или пользователя — для обеспечения «доступности и утверждения формул владельцем или пользователем основных средств» необходимо соблюсти два условия.

Во-первых, составитель формулы должен быть способен представить формулу пользователю, продемонстрировать способ ее вывода и допущения, на которых она основана, а также пояснить, почему эта формула должна использоваться в предложенном виде.

Во-вторых, пользователь или владелец основного средства должен обладать достаточными знаниями фундаментальных принципов управления реальными основными фондами, позволяющими оценить фактическую целесообразность использования той или иной формулы.

18. Важные дополнения — В документе SAE JA1011 описываются минимально допустимые технические критерии, которым должен соответствовать любой процесс, используемый для определенного основного средства, чтобы его можно было отнести к категории «RCM». Для успешного использования RCM необходимо рассмотреть вопросы управления и выделения ресурсов, описанные в данном разделе настоящего руководства под следующими заголовками:

- a. Распределение основных средств в соответствии с приоритетами и постановка целей
- b. Планирование
- c. Уровень анализа и границы основных средств
- d. Техническая документация
- e. Организация
- f. Обучение
- g. Роль программного обеспечения
- h. Сбор данных
- i. Внедрение

18.1 Распределение основных средств в соответствии с приоритетами и постановка целей — разные владельцы и пользователи выберут различные варианты использования RCM в отношении различных основных средств. Кто-то примет решение о применении принципов RCM ко всем активам. Другие остановятся на применении RCM лишь к некоторым основным средствам или их компонентам, планируя использовать RCM для оставшегося оборудования позднее. Эти решения в большей степени будут зависеть от целей анализа RCM, а также важности целей для других инициатив, осуществляемых владельцем или пользователем основных средств.

Владельцы должны осознанно распределить основные средства в соответствии с приоритетами на основе критериев, подходящих для их организации. При установке этих приоритетов следует помнить о том, что использование RCM занимает определенное время и требует затрат.

Соответственно, перед выделением значительных ресурсов руководство каждой организации должно установить, какие преимущества организация намерена получить в обмен на эти ресурсы. На практике RCM позволяет повысить общую эффективность работы использующих его организаций в самых разных областях, включая:

- a. безопасность;
- a. экологическую сознательность;
- c. производственные показатели;
- d. экономическую эффективность;
- e. качество продукции и обслуживания покупателей;
- f. эффективность техобслуживания.

- g. мотивацию отдельных сотрудников;
- h. командную работу;
- i. текучесть кадров;
- j. бухгалтерский контроль.

При выполнении анализа приоритетов не следует ограничиваться только этими вопросами, однако, их также стоит подробно изучить применительно к каждому конкретному анализу. В частности перед началом анализа RCM для любого определенного основного средства или системы необходимо установить степень, в которой каждый анализ должен повысить эффективность в каждой из указанных выше областей в соответствии с планами, и отслеживать фактические улучшения с учетом общих затрат на анализ.

18.2 Планирование — перед анализом каждого основного средства необходимо составить комплексный план, содержащий ответы на следующие вопросы.

- a. Точное определение оборудования, рассматриваемого в ходе анализа, согласно разделу 18.3.
- b. Постановка целей анализа (количественных там, где это возможно) и согласование времени и способов измерения достижений.
- c. Оценка временных затрат на выполнение анализа (человеко-часы и затраченное время).
- d. Определение набора навыков, необходимого для осуществления процесса анализа, и последующий выбор конкретных участников.
- e. Организация соответствующего обучения RCM для сотрудников, ранее не участвовавших в подобных мероприятиях (как показано ниже).
- f. Организация подходящей материально-технической базы для выполнения процесса.
- g. Принятие решения о том, когда и кем будут рассмотрены и утверждены результаты анализа. Для этого необходимо обеспечить корректное применение процесса RCM и приемлемость информации и решений для владельца или пользователя основного средства.
- h. Принятие решения о том, когда, где и кем будут реализованы полученные рекомендации.
- i. Организация процесса поддержания анализа в актуальном состоянии, описанного в разделе 16 данного руководства.

18.3 Уровень анализа и границы основных средств — перед анализом любого основного средства необходимо определить уровень, на котором должен осуществляться этот анализ (иногда называемый уровнем детализации) и установить границы системы.

При наличии всеобъемлющей иерархии основных средств и принятии решения об анализе определенного основного средства на определенном уровне, как правило, производится автоматическое включение в состав «системы» всех активов, находящихся на более низких уровнях иерархии основных средств. (Если иерархия основных средств не существует, целесообразно составить одну из них, однако эта операция не является обязательной.) К числу единственных исключений относятся подсистемы, признанные незначительными и исключенные из анализа вообще, и чрезвычайно сложные подсистемы, отложенные для отдельного анализа.

Уровень анализа представляет собой уровень детализации аппаратных средств, на котором должен осуществляться анализ. Несмотря на отсутствие наилучшего уровня анализа RCM, как правило, существует оптимальный уровень (он может отличаться для различных систем в пределах иерархии основных средств). Оптимальный уровень анализа зависит от нескольких факторов. К числу этих факторов относятся (но не ограничиваются) необходимость проведения полного или более ограниченного анализа, существование или отсутствие результатов предыдущих операций анализа и уровень, на котором они выполнялись, а также сложность рассматриваемого элемента.

Следует проявлять осторожность для выбора уровня анализа, позволяющего определять функции в относительно легкой для восприятия форме, установить управляемое количество видов отказов для каждой функции и избежать трудностей при оценке последствий отказов. При осуществлении анализа на слишком низком уровне не потребуется выполнение дополнительной аналитической работы и задач вывода. Это также затруднит идентификацию функций, связанных требуемых стандартов производительности и значительно усложнит оценку последствий. Анализ на слишком высоком уровне потребует идентификации слишком большого числа видов отказа для каждой функции, повысив вероятность того, что многие виды отказов останутся невыявленными. Логичным вариантом представляется выбор промежуточного уровня, на котором можно определить удобное количество видов отказов и в достаточной мере оценивать их последствия.

При применении RCM для любого основного средства или системы необходимо четко определить, где начинается и где заканчивается подлежащая анализу «система». Следует проявить осторожность и убедиться в том, что основные средства или компоненты, находящиеся на границах, не потеряются в образовавшихся «трещинах». Это относится главным образом к таким элементам, как клапаны и фланцы.

18.4 Техническая документация — перед анализом любой конкретной системы или подсистемы чрезвычайно полезно получить любую доступную документацию с описанием физической конфигурации основных средств, их основных компонентов и принципов работы.

В зависимости от сложности системы и от того, насколько хорошо исполнители анализа понимают эту сложность, к числу указанных документов могут относиться отдельные или все приведенные ниже составляющие:

- a. общие компоновочные чертежи;
- b. схемы трубопроводов и соединений, включая схемы технологических процессов и расположения контрольно-измерительной аппаратуры;
- c. руководства по эксплуатации и техническому обслуживанию;
- d. документация для поддержки проектирования;
- e. спецификации деталей.

Если это возможно, данную документацию следует получить у разработчиков системы и производителей или поставщиков. Существующей документации, как правило, достаточно для выполнения анализа RCM. Если какая-либо документация отсутствует (в частности, чертежи), ее необходимо создавать только в том случае, если она позволит существенно повысить точность анализа и упростить его выполнение.

18.5 Организация — любая организация, намеревающаяся использовать RCM в отношении любого основного средства, должна создать структуру, включающую следующие составляющие:

- a. Сотрудника или группу сотрудников, ответственных за соответствие используемого процесса RCM требованиям SAE JA1011 и установку четких планов с указанием объектов для анализа (см. раздел 18.1), времени этого анализа и задействованных сотрудников.
- b. Сотрудника или группу сотрудников, ответственных за выполнение анализа выбранных основных средств в полном соответствии с планом.
- c. Сотрудника или группу сотрудников, которые будут играть ведущую роль во внедрении процесса.
- d. Специалистов, которые должны быть доступны для предоставления информации и оказания поддержки при принятии решений (представители владельца или пользователя основного средства, операторы, ремонтные рабочие, представители проектировщика или поставщика (при необходимости) и т.д.).
- e. Материально-техническую базу для проведения анализа (офисы, переговорные помещения, аппаратные средства и программное обеспечение и т.д.).

18.6 Обучение — процесс RCM включает в себя множество понятий, незнакомых большинству сотрудников, поэтому перед использованием процесса каждый специалист, стремящийся внедрить RCM, должен изучить эти понятия и их взаимосвязи.

Соответственно, требования к обучению должны быть четко определены. Это условие необходимо для правильного применения процесса RCM и уверенного просмотра результатов. Продолжительность обучения членов группы RCM будет различаться в зависимости от роли каждого сотрудника.

Для специалистов, участвующих в применении процесса, являющихся поставщиками информации или задействованных во внедрении результатов каждого анализа обычно достаточно формального курса продолжительностью не менее трех дней.

Сотрудникам, которые должны играть ведущую роль при использовании этого процесса («аналитики» или «координаторы»), необходимо пройти более полный курс обучения. Подготовка должна принять форму наставничества на рабочем участке, возможно, дополненного последующим формальным обучением, проводимым до тех пор, пока стажер не станет компетентным во всех требуемых областях.

18.7 Роль программного обеспечения — собранная информация и решения, принятые в ходе анализа RCM, с легкостью могут быть сохранены в компьютеризированной базе данных. Фактически при необходимости анализировать большое количество основных средств следует использовать компьютер. Компьютер также может упростить выполнение следующих операций:

- a. сортировка предлагаемых задач по интервалам и наборам навыков;
- b. пересмотр и доработка анализа по мере накопления знаний и изменении условий эксплуатации;
- c. осуществление более сложных математических и статистических расчетов;
- d. создание множества других отчетов (виды отказов по категориям последствий, задачи по категориям задач и т.д.).

Неуместное использование компьютера для выполнения процесса может оказать значительное негативное влияние на восприятие RCM. Акцентирование внимания на компьютере может привести к тому, что процесс RCM будет восприниматься в виде механического упражнения по заполнению базы данных, а не исследования фактических нужд рассматриваемого основного средства.

18.8 Сбор данных — при использовании RCM для определенного основного средства большое значение имеют исторические данные пяти видов:

- a. исторические данные об отказе, описанные в разделе 8.4;
- b. исторические данные о производительности основного средства и связанных расходах на техническое обслуживание и эксплуатационных расходах;
- c. исторические данные о выполнении планового обслуживания;
- d. существующие задачи планового обслуживания, также упомянутые в разделе 8.4;
- e. данные о других событиях, например, последствиях отказа, вариантах износа основных средств с течением времени и т.д.

Большая часть этих данных создается, собирается и сохраняется владельцами или пользователями основных средств, несмотря на то, что в ряде случаев дополнительные данные могут предоставляться поставщиками, производителями или пользователями аналогичного оборудования. Для поддержания этих данных в актуальном состоянии требуются системы, позволяющие сохранять данные всех типов, в особенности, все виды отказов, которые на самом деле происходят на практике. (Следует отметить, что подобные системы записи должны уделять особое внимание причинам функциональных отказов и связанным с ними последствиям (например, простоем оборудования), таким же образом, как это выполняется для действий по их устранению.)

В некоторых случаях, главным образом, для сложных и опасных систем, включающих значительное количество новых технологий, достаточное количество данных о возможных видах отказов и частоте их возникновения просто не существует. В тех ситуациях, когда последствиями подобной неопределенности нельзя пренебречь, следует уделить особое внимание изменению последствий (другими словами, повторному конфигурированию системы или направлению ее использования для сокращения последствий подобной неопределенности до допустимого уровня).

18.9 Внедрение — после выполнения каждого варианта анализа RCM (и последующих обновлений) необходимо внедрить его результаты. Для успешного внедрения следует уделить особое внимание пяти ключевым этапам:

- a. Аудит RCM: каждая рекомендация должна быть формально утверждена (проверена) менеджерами, несущими ответственность за основные средства. Этот аудит необходимо производить в контексте RCM.
- b. Описание запланированных работ: задачи, полученные в процессе RCM, должны быть описаны с таким уровнем детализации, который позволит гарантировать правильное выполнение задач вне зависимости от выполняющих их сотрудников.
- c. Одноразовые изменения: каждое рекомендованное одноразовое изменение должно быть описано с уровнем детализации, позволяющим убедиться в том, что оно будет корректно реализовано.
- d. Планирование и выполнение запланированных задач: задачи должны быть объединены в исполняемые рабочие пакеты. Следует предпринять ряд шагов и убедиться в том, что эти рабочие пакеты исполняются требуемыми сотрудниками, в заданное время и правильным способом, а также обеспечить выполнение любых работ, возникающих при реализации задач, надлежащим образом. Для этого потребуется соответствующая система общего и календарного планирования.

19. Примечания

19.1 Ключевые слова — техническое обслуживание на основе контроля состояния, техническое обслуживание по текущему состоянию, профилактическое техническое обслуживание, активное техническое обслуживание, RCM, техническое обслуживание для обеспечения надежности, плановое техническое обслуживание

**ПОДГОТОВЛЕНО ПОДКОМИТЕТОМ ПО RCM SAE G-11
КОМИТЕТА ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКЕ G-11**

SAE JA1012, опубликовано в январе 2002 г.

Обоснование — нет данных.

Связь стандарта SAE со стандартом ISO — нет данных.

Область применения — документ SAE J1012 («Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (RCM)») расширяет и разъясняет все ключевые критерии, перечисленные в документе SAE J1011 («Критерии оценки программ RCM»), а также содержит описание других вопросов, являющихся важными для успешного применения RCM.

Ссылки

- SAE JA1011 — «Критерии оценки для процессов технического обслуживания для обеспечения надежности (RCM)»
- Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, «Reliability-Centered Maintenance,» Department of Defense, Washington, D.C. 1978, Report Number AD-A066579
- NAVAIR 00-25-403 — «Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process» (Командование авиационных систем ВМС США)
- MIL-P-24534 — «Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation» (Командование кораблестроения и вооружений США)
- Moubray, John, «Reliability-centered Maintenance», 1997
- NES 45 «Naval Engineering Standard 45, Requirements for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels» (ограничено для коммерческого использования)
- Anderson, Ronald T. and Neri, Lewis, «Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods», Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.
- Andrews, J.D. and Moss, T.R., «Reliability and Risk Assessment», Longman, Harlow, Essex (UK), 1993.
- Blanchard, B.S., D. Verma and Peterson, E.L., «Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management», John Wiley and Sons, New York, 1995.
- Cox, S.J. and Tait, N.R.S., «Reliability, Safety and Risk Management», Butterworth Heinemann, Oxford, 1991.
- «Dependability Management — Part 3-11: Application guide — Reliability centred maintenance», International Electrotechnical Commission, Geneva, Doc. No. 56/651/FDIS.
- Jones, Richard B., «Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach», Gulf Publishing Co., Houston, TX, 1995.
- MSG-3, «Maintenance Program Development Document», Air Transport Association, Washington, D.C. Revision 2, 1993.
- «Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis», Department of Defense, Washington, D.C. Military Standard MIL-STD-1629A, Notice 2, 1984.
- «Reliability Centered Maintenance for Aircraft, Engines and Equipment», United States Air Force, MIL-STD-1843. (ПРИМЕЧАНИЕ: документ аннулирован без замены в августе 1995 г.)

SAE JA1012, опубликовано в январе 2002 г.

«Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment,» U.S. Naval Air Systems Command, MIL-HDBK 2173(AS). (ПРИМЕЧАНИЕ: документ аннулирован без замены в августе 2001 г.)

Smith, Anthony M., «Reliability Centered Maintenance», McGraw-Hill, New York, 1993.

Zwingelstein, G., «Reliability Centered Maintenance, a practical guide for implementation», Hermes, Paris, 1996.

Разработка: подкомитет по RCM SAE G-11

Финансирование: комитет по технической поддержке SAE G-11