
Надежностная модель частичного отказа в технической системе

А.И. Зотов, В.В. Гриценко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: В статье авторами приводятся результаты исследований, связанных с влиянием частичных отказов (ЧО) на надежностные характеристики системы, определяемые через вероятность непрерывной работы за межрегламентных период в условиях сохранения работоспособности после ЧО. Расчетная модель строится из предположения, что процесс продолжения функционирования после ЧО можно рассматривать как резервирование замещением, когда резерв представляется способным выполнять послеотказовые функции, но с некоторым изменением надежностных характеристик. Рассмотрена модель с экспоненциальным законом распределения вероятностей ЧО. Приведены результаты иллюстрационного расчета и сделаны выводы.

Ключевые слова: частичный отказ, резервирование, показатели надежности отработки в межрегламентный период, расчетные соотношения для оценки надежности при ЧО.

Введение

В основе рассмотрения классического надежностного подхода к составлению модели частичного отказа (ЧО) лежит принцип оценки влияния некоторой структурной избыточности (резервирования), которая не имеет явного выражения на расчетных структурных схемах, но присутствует по сути функционального замещения [1].

Особенность ЧО состоит в том, что после его проявления возможно продолжение функционирования пораженного таким отказом устройства, но с некоторыми изменениями показателей безотказности после задействования резерва [2]. То есть фактически пораженное ЧО устройство резервируется этим же устройством, но с некоторыми ухудшениями надежностных показателей. Заметим, что такой принцип может быть распространен на случай, когда ЧО несколько и они проявляются последовательно «один за другим». Соответственно, функционирующая часть каждый раз выполняет функции резерва, т.к. забирает на себя нагрузку отказавшей части устройства.

Основная часть.

Такое резервирование можно отнести к нескольким видам или считать, как сложный случай, при котором схемы оценки (расчетов) невозможно привести к классическим вариантам [3]. Рассмотрим расчетную задачу, когда при ЧО, произошедшем в интервале $(0, T)$ некоторой системы, обладающей интенсивностью отказов λ , происходит замещение пораженного элемента оставшейся частью этой системы с «ухудшенным» показателем $\lambda + \Delta\lambda$ [4]. Для простоты выбираем экспоненциальный закон надежности, т.е. предысторию не учитываем. Варианты функционирования системы для n ЧО можно отобразить так, как это показано на рисунке 1.

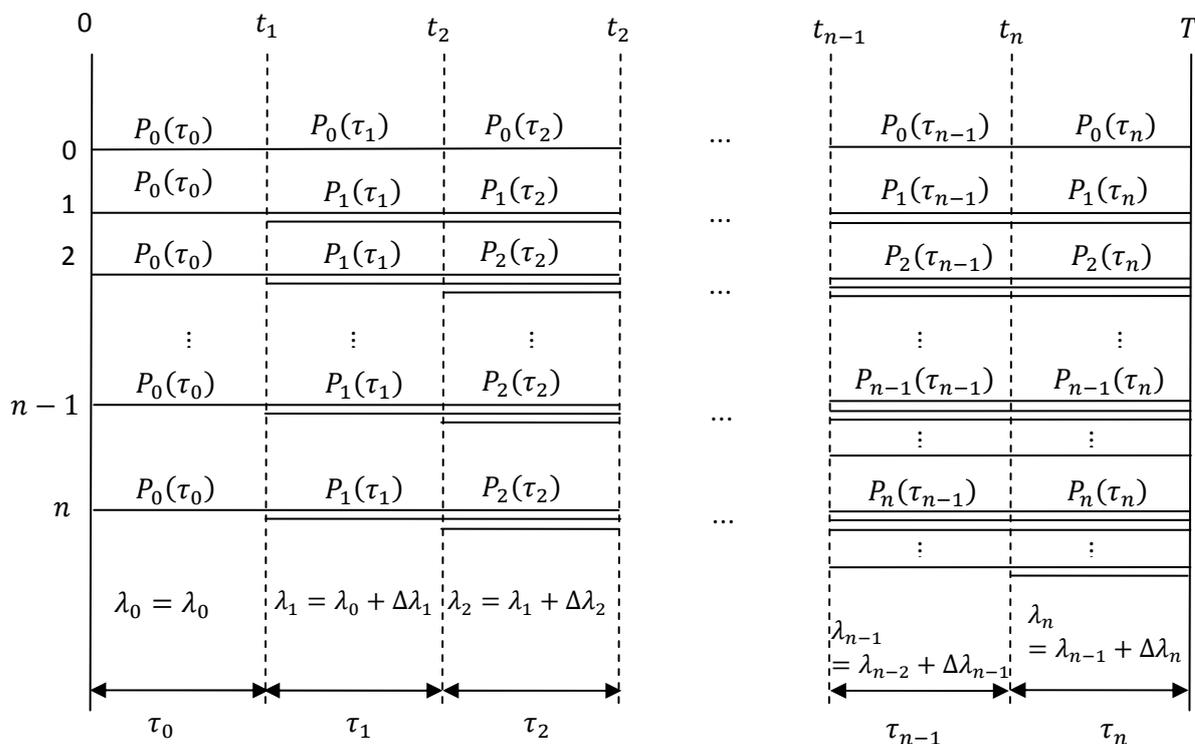


Рисунок 1. Временной график функционирования систем для n ЧО

Так как сделано предположение об изменении надежностных параметров после каждого ЧО [5], то рекуррентная последовательность расчета с использованием «благоприятных» ситуаций будет следующей:

$$P_C(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_{n-1}(t) + P_n(t), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} P_0(t) &= e^{-\lambda_0 t_0}; \\ P_1(t) &= e^{-\lambda_0 t_0} * e^{-\lambda_1 (T-t_0)}; \\ P_2(t) &= P_1(t) * e^{-\lambda_2 (T-\sum_{i=0}^1 \tau_i)}; \\ P_3(t) &= P_2(t) * e^{-\lambda_3 (T-\sum_{i=0}^2 \tau_i)}; \\ &\dots \\ P_{n-1}(t) &= P_{n-2}(t) * e^{-\lambda_{n-1} (T-\sum_{i=0}^{n-2} \tau_i)}; \\ P_n(t) &= P_{n-1}(t) * e^{-\lambda_n (T-\sum_{i=0}^{n-1} \tau_i)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Вторые множители в приведенных выше соотношениях определяют величину ухудшения основного показателя безотказности за счет некоторого увеличения интенсивности отказов из-за перераспределения нагрузки [6].

Определенный интерес может представлять ситуация, когда в межрегламентный период $(0, T)$ происходит только один ЧО и необходимо произвести надежность оценку стратегии, предусматривающей продолжение функционирования. Для этого случая:

$$\begin{aligned} P_C(t) &= P_0(t) + P_1(t) = e^{-\lambda_0 T} + e^{-\lambda_0 T} * e^{-\Delta\lambda_1 (T-\tau_1)} \\ &= e^{-\lambda_0 T} * [1 + e^{-\Delta\lambda_1 (T-\tau_1)}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Второй множитель этого выражения определяет некоторое повышение надежности отработки устройством межрегламентного времени без полных отказов за счет функционального резервирования аппаратурой, не потерявшей работоспособность в условиях ЧО [7].

Выражение (3) отображает сущность рассматриваемого резервирования, но для проведения расчетов удобнее воспользоваться выражением [3]:

$$P_1(T) = \int_0^T a(\tau_0) p(T - \tau_0) d\tau_0, \quad (4)$$

где $a(\tau_0) d\tau_0$ – вероятность ЧО в момент t_1 , (рис. 1), точнее, в малом промежутке $d\tau_0$, $a(\tau_1) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 \tau_0}$ – частота отказов, приведенная к интервалу (t_0, t_1) , $p(T - \tau_0)$ – вероятность безотказной работы резервирующей аппаратуры за время интервала (t_1, T) .

Так как в интервале (t_1, T) интенсивность отказов резервирующей аппаратуры $(\lambda_0 + \Delta\lambda_1)$, то

$$p(T - \tau_0) = e^{-(\lambda_0 + \Delta\lambda_1)(T - \tau_0)}. \quad (5)$$

Подставляя все значения вероятностей в выражение (4) и интегрируя, получаем

$$P_1(T) = \int_0^T \lambda_0 e^{-\lambda_0 \tau_0} e^{-\lambda_0 (T - \tau_0)} e^{-\lambda_1 (T - \tau_0)} d\tau_0. \quad (6)$$

Выразим значения τ_0 и $\Delta\lambda_1$, как относительные величины от T и λ_0 :

$$K_\tau = \frac{\tau_0}{T}; \quad K_\lambda = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_0}. \quad (7)$$

Приведем иллюстрационный расчет значений $P(T)$, задав показатели моделируемого процесса, как это показано в таблице 1.

Таблица 1

Значение параметра	T , час	λ_1 , 1/час	τ_0 , в соответствии с (7), час	Значения K_λ , в соответствии с (7)
Величина	4000	10^{-3}	$0,1T$	$K_\lambda^1 = 0,1, K_\lambda^2 = 0,3, K_\lambda^3 = 0,5, K_\lambda^4 = -0,2$

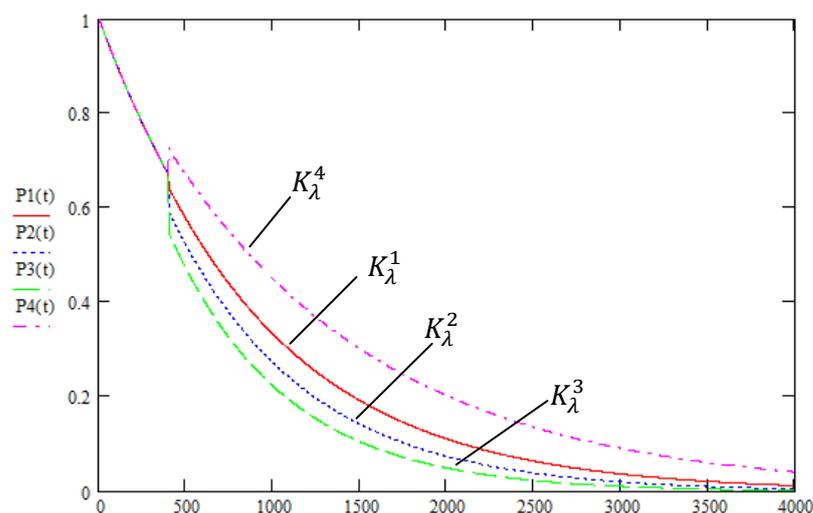


Рисунок 2. Результирующие графики расчетов.

Результаты расчетов показаны на графике (рисунок 2). С целью поиска закономерностей проведено несколько расчетов с различными величинами параметров. Анализ результирующих графиков позволил сделать не совсем строгие, но логически понятные выводы:

1. С увеличением надежности исследуемых объектов (уменьшение значений λ_0) эффективность решения о продолжении функционирования в режиме ЧО становится меньшей по надежностному критерию.

2. С увеличением K_T (момент t_1 приближается к T) выигрыш в надежности убывает, т.к. большую часть межрегламентного периода система работает безотказно.

3. Увеличение межрегламентного периода (T) при сохранении неизменными других характеристик надежности существенного влияния на выигрыши надежности за счет функционального резервирования не оказывает.

4. В случае, когда значение K_λ мало ($K_\lambda < 0,01\lambda_0$), влияние ЧО в целом на надежность функционирования системы в межрегламентный период практически не сказывается и расчет надежности проводится для случая одного отказа по формуле [3]:

$$P(T) \approx e^{-\lambda_0 T} * (1 + \lambda_0 T). \quad (8)$$

Влияние значений параметров, входящих в (6), можно оценить методами теории чувствительности (т.е. путем исследования частных производных функции $P_1(T)$) [8], однако, при экспоненциальном законе надежности результаты будут так же представлены экспонентами, а выводы определяться предельными соотношениями.

Если распределения вероятностей появления отказов на временной оси подчинено законам, отличным от экспоненциального, то за основу для вывода расчетных соотношений следует использовать рекуррентное уравнение [9], включающее в себя функцию, удовлетворяющую уравнению Вольтерра 2-го рода. При этом решения интегро-дифференциальных уравнений представляется сложной задачей, что затрудняет использование таких методов в построении систем оперативного управления надежностью.

Рассмотрение надежности модели ЧО только в плане резервирования не может обладать полнотой, т.к. решения на продолжение функционирования в каком-либо из допустимых режимов принимается человеком-оператором. Для принятия такого решения необходимо с какими-то полнотой и достоверностью обладать информацией о причинах ЧО. Известно, что такие причины могут быть или внешними или внутренними [9]. Обозримость внешних причин, связанных с воздействиями, представляется более полной для оператора, чем внутренних (конструкторских, технологических, эксплуатационных, человеко-машинных). Кроме этого, ЧО, как правило, из-за широкого спектра их возможных проявлений, не рассматриваются в эксплуатационно-технической документации, которой руководствуются во время функционирования технических устройств по назначению. В отдельных случаях (самолет в полете, судно в море и т.п.) грань между полными и частичными отказами становится условной или стирается, если невозможно осуществлять восстановление до изменения состояния объекта.

Таким образом, вероятность того, что технический объект отработает без восстановления межрегламентный период $(0, T)$ в условиях ЧО $P^*(T)$, можно представить произведением вероятностей нескольких существенных факторов:

$$P^*(T) = P(T)P_{ВФ}(T)P_{ОП}(T)P_{ПО}(T), \quad (9)$$

где $P(T)$ – вероятность отсутствия полных отказов на интервале $(0, T)$;

— $P_{ВФ}(T)$ – вероятность отсутствия внешних воздействий, способных оказать критическое воздействие на функционирование технического устройства;

— $P_{ОП}(T)$ – вероятность отсутствия ошибок в действиях оператора, способных привести к ошибочному прекращению функционирования (ошибок первого рода);

— $P_{\text{ПО}}(T)$ – вероятность безошибочной отработки программы экспертной системой (при ее наличии).

Последние два сомножителя в (9) могут быть значительно увеличены за счет возложения на бортовую экспертную систему функции оценки качества идентификации, локализации и анализа причин возникновения ЧО на техническом объекте. При этом вероятность правильности решений оператора также возрастает.

Выводы.

1. Определенный выигрыш надежности работы технического устройства в межрегламентный период при возникновении одного или нескольких ЧО без восстановления можно получить, если продолжать функционирование, возложив утраченные функции отказавшего элемента (элементов) на другие, входящие в систему и не потерявшие работоспособность.

2. Процесс продолжения работы можно рассматривать как функциональное резервирование замещением без восстановительных операций.

3. В целом надежность безотказной работы за межрегламентный период необходимо рассматривать как вероятность нескольких независимых событий, учитывающих влияние внешних воздействий, эффективность работы экспертной системы и вероятность безошибочной работы оператора, принимающего решения о продолжении функционирования в условиях ЧО.

Литература

1. Зотов А.И., Гриценко В.В., Черпаков А.В. Частичный отказ в теории надежности. // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_156N4y18_Gricenko.pdf_935280522c.pdf

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

3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. 2006, С.102-109.

4. Зотов А.И., Гриценко В.В., Модель выбора решения о продолжении функционирования технического объекта в условиях частичного отказа по критерию экономической целесообразности. // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_144_Zotov_N.pdf_5ce4a02e25.pdf

5. Зотов А.И., Гриценко В.В., Модель деградации частичного отказа в технической системе. // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_144_Zotov_N.pdf_5ce4a02e25.pdf

6. Baffa Sania, Ramatu Idris Gatawab, Ibrahim Yusufc Reliability assessment of deteriorating system, Reliability: Theory & Applications, 2017, pp.20-28.

7. Виноградов С.А., Корнилов И.А. Методика оценки показателей надежности многоосных специальных колесных шасси на этапе эксплуатации. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2008, С.451-453.

8. Гишваров А. С. Моделирование ускоренных испытаний технических систем на надежность и ресурс. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета, №1 2007, С.26-40.

9. B. Tchórzewska-Cieślak Fuzzy failure risk analysis in drinking water technical system. Reliability: Theory & Applications, 2011. pp.138-148.

10. Перфильев О.В., Рыжаков С.Г. Экспертная система анализа причин неисправностей для авиационной техники. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2016, С.564-570.

References

1. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_156N4y18_Gricenko.pdf_935280522c.pdf
2. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. «Sistemniy analiz, upravlenie i obrabotka informacii», 2017, pp.45-47.
3. Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovi teorii nadezhnost` [Basics of the theory reliability]. 2006, pp.102-109.
4. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_144_Zotov_N.pdf_5ce4a02e25.pdf
5. Zotov A.I., Gritsenko V.V., Cherpakov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_144_Zotov_N.pdf_5ce4a02e25.pdf
6. Baffa Sania, Ramatu Idris Gatawab, Ibrahim Yusufc Reliability assessment of deteriorating system, Reliability: Theory & Applications, 2017, pp. 20-28.
7. Vinogradov S.A., Kornilov I.A. Trudy` Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost` i kachestvo», 2008, pp. 451-453.
8. Gishvarov A.S. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo texnicheskogo universiteta, №1 2007, pp.26-40.
9. B. Tchórzewska-Cieślak Fuzzy failure risk analysis in drinking water technical system. Reliability: Theory & Applications, 2011. pp.138-148.
10. Perfil`ev O.V., Ry`zhakov S.G. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2016, pp.564-570.