

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА МЕЖДУ ЕГО УЗЛАМИ И АГРЕГАТАМИ

Рассматривается вопрос о предъявлении требований к надежности отдельных узлов и агрегатов технического объекта на этапе эскизного проектирования для случая, когда требования по надежности системы в целом известны.

Ключевые слова: технический объект, узлы и агрегаты, наработка на отказ, наработка до отказа, безотказная работа, интенсивность отказов, восстановление технического объекта.

Постановка проблемы. Практически к любому проектируемому техническому объекту предъявляются вполне определенные требования с точки зрения его надежности. Допустим, что при отказе любого узла технический объект теряет работоспособность. Такая формулировка отказа технического объекта приводит к структурной схеме надежности технического объекта, в котором все элементы узлы, агрегаты (элементы) с точки зрения надежности соединены последовательно.

Одна из задач, возникающих перед конструктором технического объекта, сводится к распределению требований к надежности технического объекта в целом между отдельными его узлами и агрегатами. Пусть решено выполнить проектируемый технический объект в виде ограниченного количества узлов и агрегатов, общее число которых обозначим через n . Рассмотрим, каким образом можно предъявить требования к надежности отдельных узлов и агрегатов (УА), если такие требования предъявлены к техническому объекту (ТО) в целом.

1. Распределение требований при расчете характеристик безотказности

Требования к безотказности проектируемого ТО задаются обычно в виде вероятности безотказной работы в течение определенного отрезка времени $R_c(\tau)$ (оперативный показатель) либо в виде наработки на отказ $\bar{T}_0$ для ремонтируемого ТО или средней наработки до отказа $\bar{T}_1$ для неремонтируемого ТО (технический показатель).

Пусть ТО должен иметь вероятность безотказной работы в течение времени τ не хуже $R_{cz}(\tau)$ заданный оперативный показатель безотказности. ТО должен, быть спроектирован таким образом, чтобы полученная в результате расчета вероятность безотказной работы $R_{cp}(\tau)$ была не хуже заданной, т. е.

$$R_{cp}(\tau) \geq R_{cz}(\tau). \quad (1.1)$$

Если обозначить через $R_i(\tau)$ вероятность безотказной работы i -го УА технического объекта за время τ , то вероятность безотказной работы ТО, состоящей из n УА, за тот же отрезок времени при последовательном с точки зрения надежности соединении УА будет равна

$$R_c(\tau) = \prod_{i=1}^n R_i(\tau) = e^{-\lambda_c \tau}. \quad (1.2)$$

Интенсивность отказов λ_c в данном случае будет равна сумме интенсивностей отказов отдельных УА λ_i

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (1.3)$$

Поскольку при расчете показателей безотказности исходными данными являются значения интенсивностей отказов комплектующих УА технического объекта, то требования к безотказности формулируют [2] через интенсивности отказов. Так для известного периода τ и заданной вероятности безотказной работы ТО на этот период $R_{cз}(\tau)$ можно определить допустимую величину интенсивности отказов ТО:

$$\lambda_{с\text{ доп}} = \left| \frac{\ln R_{cз}(\tau)}{\tau} \right|. \quad (1.4)$$

Для обеспечения заданной вероятности безотказной работы всего ТО $R_{cз}(\tau)$ необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{ip} \leq \lambda_{с\text{ доп}}. \quad (1.5)$$

Отсюда ясно, что требования по безотказности к отдельным УА можно задать через их интенсивности отказов.

Если бы удалось сконструировать равнонадежные («равнопрочные») УА, то допустимое значение интенсивности отказов каждого проектируемого УА можно было бы определить как

$$\bar{\lambda}_{ya\text{ доп}} = \frac{\lambda_{с\text{ доп}}}{n}. \quad (1.6)$$

Чаще всего УА технического объекта имеют различные значения интенсивностей отказов, большие или меньшие $\bar{\lambda}_{ya\text{ доп}}$. Чтобы учесть это, вводят [2] так называемый «весовые коэффициенты» δ_i , показывающие, насколько больше или меньше процент отказов i -го УА по сравнению с равнонадежным УА. С учетом весовых коэффициентов допустимые значения интенсивностей отказов УА принимают равными

$$\lambda_{i\text{ доп}} = \delta_i \lambda_{i\text{ доп}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.7)$$

Допустимые значения интенсивностей отказов отдельных УА можно определить по следующей формуле

$$\lambda_{i\text{сдоп}} = \lambda_{i\text{ доп}} Q_i, \quad (1.8)$$

где Q_i доля отказов ТО, приходящаяся на i -й УА или коэффициент отказа i -го УА. Величина Q_i имеет смысл условной вероятности. Это вероятность того, что ТО отказал из-за отказа i -го УА или, иными словами, вероятность отказа ТО по причине отказа i -го УА. Так как ТО находится, в состоянии отказа, то $\sum_{i=1}^n Q_i = 1$.

При умножении значения Q_i на 100 получим распределение отказов ТО по УА в процентах.

Формула (8) не противоречит (7). Действительно,

$$m_i = Q_i \cdot 100; m_{cp} = 100 / n; \delta_i = m_i / m_{cp} = Q_i n;$$

$$\lambda_{i \text{ доп}} = \delta_i \bar{\lambda}_{\text{доп}} = Q_i n \frac{\lambda_{c \text{ доп}}}{n} = Q_i \lambda_{c \text{ доп}}.$$

На этапе эскизного проектирования значения Q_i могут быть определены следующим образом: 1) на основании данных об отказах аналогичных ТО, находящихся в эксплуатации («предшествующих» ТО). В этом случае Q_i коэффициенты отказов УА или распределение отказов ТО по УА:

$$Q_i = \frac{\text{все отказы } i\text{-го УА}}{\text{все отказы ТО}};$$

2) если нет предшествующего аналогичного ТО, то с достаточной для практических расчетов точностью Q_i можно определить по формуле

$$Q_i; \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_c}. \quad (1.9)$$

В данном случае необходимо провести детализовку УА и определить интенсивность отказов каждого УА λ_i через интенсивности отказов комплектующих деталей.

Не исключены и другие подходы к определению Q_i . При этом следует иметь в виду, что, задавая определенные значения Q_i , можно распределить требования по достижению заданной вероятности безотказной работы ТО между разработчиками отдельных УА. В силу того, что $\sum_i Q_i = 1$, снизив требования к надежности одного из УА, следует повысить требования к другому.

Определив Q_i и допустимое значение интенсивности отказов для каждого УА $\lambda_{i \text{ доп}}$ в дальнейшем в процессе расчета надежности необходимо проверять, чтобы расчетное значение интенсивности отказов $\lambda_{i \text{ р}}$ каждого УА не превышало допустимого значения

$$\lambda_{i \text{ р}} \leq \lambda_{i \text{ доп}}.$$

В этом случае и оперативный показатель вероятность безотказной работы $R_{c \text{ р}}(t)$, и технический средняя наработка до отказа $\bar{T}_1$ для неремонтируемого ТО или наработка на отказ $\bar{T}_0$ будут не хуже заданных. Если условие (10) не выполняется, то необходимо принять меры к повышению надежности проектируемых УА (облегчение режимов использования комплектующих деталей, использование более надежных деталей, резервирование и др.).

2. Распределение требований к ремонтпригодности ТО между его отдельными УА

Требования к ремонтпригодности проектируемого ТО задаются обычно в виде вероятности восстановления работоспособности ТО за отведенное время $V(t)$ (оперативный показатель) либо в виде среднего времени восстановления ТО $\bar{T}_в$ (технический показатель). Часто требования к ремонтпригодности задаются косвенно через коэффициент готовности ТО K_r (внутренняя готовность), стационарное значение которого (для достаточно большого периода эксплуатации) равно

$$K_{\Gamma} = \bar{T}_o / (\bar{T}_o + \bar{T}_v). \quad (2.1)$$

Этот показатель имеет смысл вероятности в том чтобы заставить ТО, в работоспособном состоянии в произвольный момент времени. Запишем коэффициент готовности ТО в виде

$$K_{\Gamma} = \frac{\bar{T}_o}{\bar{T}_o + \bar{T}_v} = \frac{1}{1 + \bar{T}_v / \bar{T}_o} = \frac{1}{1 + u_c}. \quad (2.2)$$

Величину u_c назовем коэффициентом средних удельных затрат на восстановление работоспособности ТО или короче коэффициентом затрат на восстановление. Этот коэффициент показывает, сколько времени требуется в среднем на восстановление работоспособности ТО для обеспечения одного часа безотказной работы.

При заданном значении коэффициента готовности проект должен быть выполнен таким образом, чтобы расчетное значение коэффициента готовности было не хуже заданного:

$$K_{\Gamma p} \geq K_{\Gamma з}. \quad (2.3)$$

Это условие будет выполнено, если коэффициент затрат на восстановление ТО будет, как это следует из (2.2) и (2.3), удовлетворять условию

$$u_c = \frac{\bar{T}_v}{\bar{T}_o} \leq \frac{1 - K_{\Gamma з}}{K_{\Gamma з}}. \quad (2.4)$$

Множество комбинаций $\bar{T}_o$ и $\bar{T}_v$, удовлетворяющих этому неравенству, образует область допустимых вариантов проекта ТО. Отсюда ясно, что в процессе проектирования необходимо добиваться компромисса между наработкой на отказ $\bar{T}_o$ и средним временем восстановления $\bar{T}_v$.

Ограничимся случаем, когда наработка ТО на отказ определена исходя из заданной вероятности безотказной работы (в результате вычисления характеристик безотказности составляет величину $\bar{T}_{op}$) и известно заданное значение коэффициента готовности ТО $K_{\Gamma з}$. Сколько времени можно теперь планировать на восстановление работоспособности ТО?

При известном значении $\bar{T}_{op}$ и заданном значении коэффициента готовности технического объекта $K_{\Gamma з}$ область допустимых значений среднего времени восстановления, ТО должна лежать ниже некоторого допустимого значения $\bar{T}_{v доп}$:

$$\bar{T}_v \leq \bar{T}_{v доп} = \bar{T}_{op} \frac{1 - K_{\Gamma з}}{K_{\Gamma з}} \quad (2.5)$$

Может оказаться, что допустимое время восстановления $\bar{T}_{v доп}$ будет иметь столь малую величину, что за это время отремонтировать ТО будет просто физически невозможно и тогда придется увеличивать наработку на отказ ТО для получения приемлемого, с точки зрения заданного коэффициента готовности, значения

допустимого среднего времени восстановления $\bar{T}_{в доп}$. Такой вариант вполне возможен. Однако вначале необходимо оценить допустимое время восстановления при полученной наработке на отказ $\bar{T}_{о р}$.

Определим среднее время восстановления ТО, который отказывает при отказе любого УА и считается неработоспособным до тех пор, пока отказавший УА не будет отремонтирован. В данном случае поведение ТО во время восстановления УА аналогично поведению системы с конечным временем восстановления отказавшего элемента [1]. Поэтому среднее время восстановления ТО определим по формуле, приведенной в [1]. С учетом принятых обозначений имеем

$$\bar{T}_в = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\omega_c} \bar{T}_{в i}, \quad (2.6)$$

где ω_i и ω_c параметры потоков отказов i -го УА и ТО соответственно.

Заметим, что в [1] формула (2.4.46) получена в предположении, что число элементов в системе велико, а параметр потока отказов каждого элемента составляет бесконечно малую долю от общего параметра потока отказов системы. Хотя число УА реального ТО невелико, а каждый УА вносит разный вклад в объединенный процесс отказов ТО, мы можем с достаточной для практических расчетов точностью воспользоваться этой формулой.

Поскольку при расчете показателей безотказности ТО интенсивности отказов отдельных комплектующих УА (деталей) принимались постоянными, т. е. время безотказной работы отдельных комплектующих деталей, УА и всего ТО принималось распределенным экспоненциально, то параметры потоков отказов отдельных деталей, УА и ТО в целом равны соответствующим интенсивностям отказов. Поэтому

$$\omega_i = \lambda_i, \text{ а } \omega_c = \lambda_c.$$

С учетом этого среднее время восстановления ТО можно записать в виде

$$\bar{T}_в = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_c} \bar{T}_{в i} = \sum_{i=1}^n Q_i \bar{T}_в, \quad (2.7)$$

где Q_i вероятность отказа ТО из-за отказа i -го УА, полученная при расчете показателей безотказности; $\bar{T}_{в i}$ среднее время восстановления i -го УА.

Учитывая, что $1/\omega_c = 1/\lambda_c = \bar{T}_о$ наработка ТО на отказ, а $1/\omega_i = 1/\lambda_i = \bar{T}_{о i}$ наработка на отказ i -го УА, среднее время восстановления ТО можно записать в виде

$$\bar{T}_в = \bar{T}_о \sum_{i=1}^n \frac{\bar{T}_{в i}}{\bar{T}_{о i}} \bar{T}_в = \bar{T}_о \sum_{i=1}^n u_i, \quad (2.8)$$

где u_i — коэффициент затрат на восстановление i -го УА. Подставив полученное значение в формулу для стационарного значения коэффициента готовности, получим

$$K_r = \frac{\bar{T}_о}{\bar{T}_о + \bar{T}_о \sum_{i=1}^n u_i} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n u_i}, \quad (2.9)$$

Откуда следует, что коэффициент затрат на восстановление ТО равен сумме коэффициентов затрат на восстановление отдельных УА

$$u_c = \sum_{i=1}^n u_i. \quad (2.10)$$

Используем аддитивность показателя (2.10) для распределения требований к ремонтпригодности (восстанавливаемости) ТО между ее отдельными УА. Нас интересует среднее, время восстановления каждого УА с точки зрения влияния на коэффициент готовности ТО. Поэтому подойдем к распределению требований с позиции «равного влияния» («равного вклада») каждого УА на коэффициент готовности ТО, для чего, потребуем равенства коэффициентов затрат на восстановление отдельных УА, т. е.

$$\frac{T_{в1}}{T_{о1}} = \frac{T_{в2}}{T_{о2}} = \dots = \frac{T_{вn}}{T_{он}}. \quad (2.11)$$

Физически это требование означает, что УА, отказывающийся чаще, должен восстанавливаться быстрее по сравнению с УА, который отказывает реже. Из (2.11) с учетом требований (2.4) получаем, что для обеспечения заданного коэффициента готовности ТО допустимое среднее время восстановления каждого УА технического объекта должно быть не более

$$\bar{T}_{в\text{ доп}} = \frac{u_c}{nK} \bar{T}_{в\text{ ир}} \leq \frac{(1 - K_{гз}) \bar{T}_{о\text{ ир}}}{K_{гз}}. \quad (2.12)$$

Выводы. Предложенный метод позволяет проиллюстрировать распределение требований к восстанавливаемости отдельных УА технического объекта, а так же определять, сколько времени будет затрачено на ремонт отдельно взятого УА технического объекта с учетом заданного времени на отказ.

Литература

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М., «Наука», 1965.
2. Кузнецов В. А. Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия», 1965.

Розглядається питання з пред'явленням вимог до надійності окремих вузлів і агрегатів технічного об'єкту на етапі ескізного проектування для випадку, коли вимоги по надійності системи в цілому відомі.

Ключові слова: *технічний об'єкт, вузли та агрегати, наробіток на відмову, наробіток до відмови, безвідмовна робота, інтенсивність відмов, відновлення технічного об'єкту.*

A question is examined about producing of requirements to reliability of separate knots and aggregates of technical object on the stage of the preliminary planning for a case, when requirement on reliability of the system on the whole known.

Key words: *technical object, knots and aggregates, work on a refuse, work completely, faultless work, intensity of refuses, renewal of technical object.*

Капица М. И.

д. т. н, проф. кафедры «Локомотивы»
Днепропетровского национального
университета железнодорожного
транспорта, г. Днепропетровск, Украина
m.i.kapica@ua.fm

Крячко В. А.

финансовый директор,
ОАО «Днепропетровский стрелочный завод»,
г. Днепропетровск, Украина

Рецензент: д. т. н. проф. Дубинец Л.В.