

УДК 62-522

Н.Н. ФАТЕЕВА, канд. техн. наук; ст. преп. НТУ «ХПИ», г. Харьков
А.Н. ФАТЕЕВ, ведущий инженер ОП Корпорации «Гидроэлекс», г. Харьков

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ В СИСТЕМАХ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ НА ЭТАПЕ ИХ СИНТЕЗА

Приведено результати досліджень по розподілу нормованих показників надійності в системах гідропневмоагрегатів, їх розрахунок, з використанням методів розподілу вимог по надійності: пропорційного і з урахуванням відносної уразливості елементів. Запропонований підхід дозволяє вже на ранній стадії проектування систем гідро- і пневмоприводів нормувати показники надійності.

The results of researches on distribution rationed of parameters of reliability in systems of hydrounits and pneumounits, their account, with use of methods of distribution of the requirements on reliability are given: proportional and in view of relative vulnerability of elements. The offered approach allows already on early stages of designing of systems hydro- and pneumodrives to ration parameters of reliability.

Изучение и оценку надежности гидропневмоагрегатов наиболее предпочтительно проводить на этапе проектирования, учитывая также, что именно при проектировании закладываются основы надежности новой конструкции агрегата. Поэтому важнейшим и необходимым в решении проблемы повышения надежности и эффективности новой техники являются разработка и практическое применение научно-обоснованных методов расчетов надежности гидропневмооборудования на стадии проектирования. Отсутствие в настоящее время систематизированных данных о распределении нормируемых показателей надежности для гидропневмоагрегатов ведет к тому, что расчетная оценка этого фактора в процессе проектирования затруднительна.

Конкретные формы задания требований и выбор номенклатуры показателей надежности осуществляется на основе экспертного анализа.

Очень часто требования надежности на создаваемые системы задаются на основе достигнутого уровня надежности на системах-аналогах или модернизируемых системах. В этом случае в дополнение к экспертным оценкам используют статистические данные о достигнутых характеристиках надежности основных составных частей системы [1].

Все показатели надежности проектируемых систем должны обеспечивать нормальное функционирование систем в течение заданного срока эксплуатации.

Распределение норм надежности проводят на этапах эскизного и рабочего проектирования технической системы. Предполагается, что на любом из этих этапов конструирования систему можно разбить на некоторое число подсистем в виде отдельных сборочных единиц и исходить из начальной надежности каждой подсистемы, полученной расчетом или по результатам испытаний подсистемы.

Для гидропневмоагрегатов, реализованных стандартной позиционной структурой (СПС) или методом минимизации [2, 3] применим методы распределения нормируемых показателей надежности, опираясь на общую теорию надежности, а именно: метод пропорционального распределения и метод распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов.

Метод пропорционального распределения [4, 5]. Этот метод используется в том случае, когда система представляется в виде последовательного соединения подсистем,

причем каждая подсистема содержит k_i элементов. В этом случае надежность i -той подсистемы определяется соотношением:

$$P_i = \sqrt[\alpha_i]{P^{\text{TP}}},$$

где $\alpha_i = \left(\sum_{i=1}^n k_i \right) / k_i$.

Здесь α_i – число «приведенных» элементов; n – число подсистем, входящих в систему.

Если известны интенсивности отказов элементов, то метод пропорционального распределения можно записать так

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot k_{ij}}{\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot k_{ij}}, \quad (1)$$

где λ_j – интенсивность j -го элемента.

Метод распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов [4, 5]. Этот метод также основан на допущении о том, что элементы системы соединены последовательно, имеют постоянную интенсивность отказов, причем отказ любого элемента приводит к отказу системы и, кроме того, заданная наработка элементов равна заданной наработке системы.

Суть метода заключается в том, чтобы подобрать такие λ_j^{TP} , которые бы удовлетворяли неравенству

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^{\text{TP}} \leq \Lambda^{\text{TP}}, \quad (2)$$

где λ_j^{TP} – требуемая интенсивность отказов j -го элемента; Λ^{TP} – требуемая интенсивность отказов системы.

Подбор элементов с требуемой интенсивностью λ_j^{TP} проводится в два этапа. На первом этапе определяют интенсивность отказов λ_j по результатам испытаний. Затем задают весовые множители ω_j для каждого элемента системы в соответствии с интенсивностями отказов, полученными на первом этапе

$$\omega_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где n – число элементов, входящих в систему.

Таким образом, весовой множитель ω_j показывает относительную уязвимость j -го элемента.

При этом

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1. \quad (4)$$

Далее вычисляют требуемые интенсивности отказов элементов с помощью соотношения

$$\lambda_j^{TP} = \omega_j \cdot \Lambda^{TP}, \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Тогда выражение (2) рассматривается как равенство

$$\sum_{j=1}^n \omega_j \cdot \lambda_j = \Lambda^{TP}. \quad (6)$$

Проведем анализ методов на примере пневмоагрегата грузозачного устройства к токарному станку [6].

Рассмотрим данный пневмоагрегат, реализованный СПС. Вначале проанализируем командоаппарат и применим к нему метод пропорционального распределения показателей надежности. Командоаппарат данного пневмоагрегата состоит из десяти подсистем ($n = 10$), каждая подсистема состоит из трех элементов ($k_i = 3$): элемент И (\wedge), элемент памяти (ЭП) и элемент ИЛИ (\vee) (см. рис.) с известными интенсивностями отказов. Интенсивность отказов элементов \wedge и ЭП: $\lambda_{\text{ЭП}} = \lambda_{\wedge} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, интенсивность отказов элементов \vee : $\lambda_{\vee} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ [7]. Требуется обеспечить вероятность безотказной работы $P^{TP}(t) = 0,8$ в течение времени $t = 3000 \text{ ч}$.

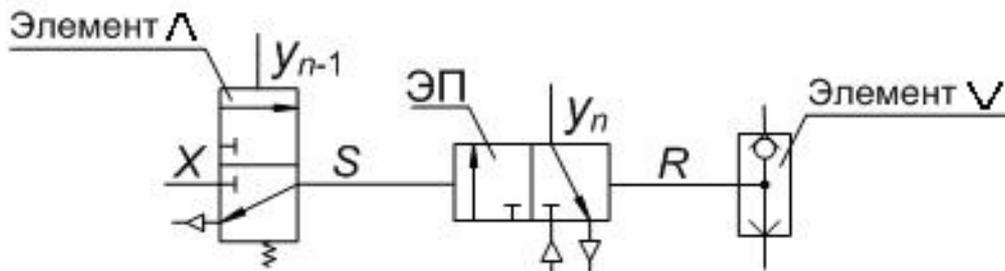


Рис. Подсистема командоаппарата

Используя соотношение (1) метода пропорционального распределения, определяем число «приведенных» элементов при известных интенсивностях отказов элементов

$$\alpha_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot k_{ij}}{\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot k_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^2 (2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 3) \cdot \sum_{i=1}^{10} 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3}{\sum_{j=1}^2 (2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 3) \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 100.$$

Тогда требуемое значение вероятности безотказной работы подсистемы командоаппарата

$$P_{КА}^{под} = \sqrt[\alpha_i]{P^{TP}} = \sqrt[100]{0,8} = 0,998.$$

К оставшимся элементам целесообразно применить метод распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов. Кроме командоаппарата данный пневмоагрегат содержит семь выключателей конечных (ВК), кнопки «Пуск» и «Стоп», переключатель режимов X_2 и два промежуточных элемента \wedge .

Базисом является постоянная аппаратная часть гидропневмоагрегата, которая остается неизменной как при реализации схемы методом стандартной позиционной структуры, так и при реализации методом минимизации. Варьируемой частью гидропневмоагрегата являются промежуточные элементы, количество которых, в общем случае, зависит от способов реализации логических функций.

Базисом пневмоагрегата являются семь ВК, кнопки «Пуск» и «Стоп», переключатель режимов X_2 , т. е. базис состоит из десяти элементов \wedge , а варьируемая часть пневмоагрегата из двух промежуточных элементов \wedge , количество которых, в общем случае, зависит от способов реализации логических функций. Так как вышеперечисленные элементы являются распределительными устройствами, то средняя интенсивность отказов для них равна $\lambda_{\wedge} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Требуемая вероятность безотказной работы за время $t = 3000 \text{ ч}$ равна $P^{\text{ТР}}(t) = 0,8$. Найдем требуемые значения вероятности безотказной работы элементов.

Используя (3), вычислим коэффициенты уязвимости

$$\omega_{\wedge} = \omega_{\text{ПЭ}} = \frac{\lambda_{\wedge}}{10\lambda_{\wedge} + 2\lambda_{\text{ПЭ}}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6}} = 0,083.$$

Принимая экспоненциальный закон распределения, находим требуемую интенсивность отказов агрегата $P^{\text{ТР}}(t) = e^{-\Lambda^{\text{ТР}} t} = 0,8$.

Откуда
$$\Lambda^{\text{ТР}} = -\frac{\ln P(t)}{t} = -\frac{\ln 0,8}{3000} = 0,74 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Далее по выражению (5) определяем требуемые интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{ПЭ}}^{\text{ТР}} = \lambda_{\wedge}^{\text{ТР}} = \omega_{\wedge} \cdot \Lambda^{\text{ТР}} = 0,083 \cdot 0,74 \cdot 10^{-4} = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Соответственно требуемые значения вероятности безотказной работы элементов

$$P_{\wedge}(t) = e^{-\lambda^{\text{ТР}} \cdot t} = e^{-6,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3000} = 0,98.$$

Проверим правильность нормирования показателей надежности элементов, вычислив общую вероятность безотказной работы пневмоагрегата.

Вероятность безотказной работы базиса, состоящего из десяти элементов \wedge

$$P_{\text{Базис}}(t) = P_{\wedge}(t)^{10} = 0,98^{10} = 0,82.$$

Вероятность безотказной работы двух промежуточных элементов \wedge

$$P_{\text{ПЭ}}(t) = P_{\wedge}(t)^2 = 0,98^2 = 0,96.$$

Общая вероятность безотказной работы пневмоагрегата будет определяться из соотношения:

$$P_{\text{СПС ПА}}(t) = (P_{\text{КА}}^{\text{под}})^n \cdot P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t) = 0,998^{10} \cdot 0,82 \cdot 0,96 = 0,8 = P^{\text{ТР}}(t),$$

нормирование произведено верно и отвечает заданным условиям.

Воспользуемся методом распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов для пневмоагрегата загрузочного устройства к токарному станку, реализованного методом минимизации. В данном случае был получен пневмоагрегат, содержащий базис, один ЭП и три промежуточных элемента: элемент \vee и два элемента \wedge , для которых по результатам испытаний получены оценки интенсивностей отказов: $\lambda_{\wedge} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{ЭП}} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{\vee} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Требуемая вероятность безотказной работы за время $t = 3000 \text{ ч}$ равна $P^{\text{ТР}}(t) = 0,8$. Найдем требуемые значения вероятности безотказной работы элементов.

Используя (3), вычислим коэффициенты уязвимости:

$$\omega_{\wedge} = \frac{\lambda_{\wedge}}{10\lambda_{\wedge} + \lambda_{\text{ЭП}} + 2\lambda_{\wedge} + \lambda_{\vee}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2,7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,072;$$

$$\omega_{\text{ЭП}} = \frac{\lambda_{\text{ЭП}}}{10\lambda_{\wedge} + \lambda_{\text{ЭП}} + 2\lambda_{\wedge} + \lambda_{\vee}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2,7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,072;$$

$$\omega_{\vee} = \frac{\lambda_{\vee}}{10\lambda_{\wedge} + \lambda_{\text{ЭП}} + 2\lambda_{\wedge} + \lambda_{\vee}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2,7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} + 2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,066.$$

Принимая экспоненциальный закон распределения, находим требуемую интенсивность отказов агрегата $P^{\text{ТР}}(t) = e^{-\Lambda^{\text{ТР}}t} = 0,8$.

$$\text{Откуда} \quad \Lambda^{\text{ТР}} = -\frac{\ln P(t)}{t} = -\frac{\ln 0,8}{3000} = 0,74 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Далее по выражению (5) определяем требуемые интенсивности отказов элементов (ч^{-1}):

$$\lambda_{\wedge}^{\text{ТР}} = \omega_{\wedge} \cdot \Lambda^{\text{ТР}} = 0,072 \cdot 0,74 \cdot 10^{-4} = 5,3 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_{\text{ЭП}}^{\text{ТР}} = \omega_{\text{ЭП}} \cdot \Lambda^{\text{ТР}} = 0,072 \cdot 0,74 \cdot 10^{-4} = 5,3 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_{\vee}^{\text{ТР}} = \omega_{\vee} \cdot \Lambda^{\text{ТР}} = 0,066 \cdot 0,74 \cdot 10^{-4} = 4,9 \cdot 10^{-6}.$$

Соответственно требуемые значения вероятности безотказной работы элементов:

$$P_{\wedge}(t) = e^{-5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 3000} = 0,984; \quad P_{\text{ЭП}}(t) = e^{-5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 3000} = 0,984; \quad P_{\vee}(t) = e^{-4,9 \cdot 10^{-6} \cdot 3000} = 0,985.$$

Проверим правильность нормирования показателей надежности элементов, вычислив общую вероятность безотказной работы пневмоагрегата.

Вероятность безотказной работы базиса, состоящего из десяти элементов \wedge

$$P_{\text{Базис}}(t) = P_{\wedge}(t)^{10} = 0,984^{10} = 0,85.$$

Вероятность безотказной работы трех промежуточных элементов: элемента \vee и двух элементов \wedge

$$P_{\text{ПЭ}}(t) = P_{\wedge}(t)^2 \cdot P_{\vee}(t) = 0,984^2 \cdot 0,985 = 0,954.$$

Общая вероятность безотказной работы системы будет определяться из соотношения:

$$P_{\text{min ПА}}(t) = P_{\text{ЭП}}(t) \cdot P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t) = 0,984 \cdot 0,85 \cdot 0,954 = 0,8 = P^{\text{ТР}}(t),$$

нормирование произведено верно и отвечает заданным условиям.

Таким образом, используя методы распределения нормируемых показателей надежности, уже на стадии проектирования можно заложить требуемую безотказность работы гидропневмоагрегатов. Подводя итоги анализа, можно отметить, что для гидропневмоагрегатов, реализованных методом СПС, распределение нормируемых показателей надежности на этапе проектирования наиболее предпочтительно проводить двумя методами: методом пропорционального распределения и методом распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов, а для гидропневмоагрегатов, реализованных методом минимизации, распределение нормируемых показателей надежности предпочтительно проводить методом распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов. Предложенный подход позволяет уже на ранних стадиях проектирования гидропневмоагрегатов нормировать показатели надежности, что дает возможность получать оптимальные решения вопросов надежности на последующих этапах разработки жизненного цикла агрегата.

Список литературы: 1. Сырицын Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода. – М.: Машиностроение, 1981. – 216 с. 2. Черкашенко М.В. Гидропневмоавтоматика. – Харьков: Гидроэлект, 2002. – 75 с. 3. Черкашенко М.В. Автоматизация проектирования систем гидро- и пневмоприводов с дискретным управлением: Навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2001. – 182 с. 4. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе их проектирования и испытания опытных образцов. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с. 5. Надежность технических систем: [Справочник] / Ю.К. Беляев, И.А. Ушаков – М.: Радио и связь, 1983. – 606 с. 6. Фатеева Н.Н. Оценка количественных показателей надежности гидропневмоагрегатов на этапе их синтеза / Н.Н. Фатеева, А.Н. Фатеев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2005. – № 29. – С. 95-98. 7. Сырицын Т. А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмопривода. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с.

© Фатеева Н.Н., Фатеев А.Н., 2010
Поступила в редколлегию 15.02.10