

УДК 62-522

**Н.Н. ФАТЕЕВА**, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ», г. Харьков

### **АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ В СИСТЕМАХ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ НА ЭТАПЕ ИХ СИНТЕЗА**

Розглядається вибір методу розрахунку і визначення розрахункових співвідношень для знаходження кількісних характеристик показників безвідмовності проектного гідропневмоагрегату. Проведено розрахунок кількісних показників безвідмовності й отримано алгоритм для розрахунку кількісних показників надійності на етапі проектування.

The choice of method of calculation and determination of correlations is examined for finding of quantitative descriptions of indexes of faultlessness of hydrounits and pneumounits. The calculation of quantitative indexes of faultlessness is conducted and got algorithm for the calculation of quantitative reliability indexes on the stage of planning.

*Введение.* Проектирование сложных гидро- и пневмоагрегатов невозможно без учета и анализа надежности. Недостаточная надежность может привести не только к чрезмерным эксплуатационным издержкам (ремонт и восстановление), но и к более тяжким последствиям (невыполнение задачи, опасные ситуации, аварии). Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют устанавливать количественные показатели надежности, сравнивать различные варианты по этим показателям, упрощать и сокращать процесс выбора лучшего варианта проектируемой системы.

Порядок расчета определяется на основании: критериев или показателей надежности, которые надо определить; характера имеющихся в наличии данных; вида отказов; закона распределения отказов; конструктивных особенностей системы или гидропневмоагрегата; режима и условий эксплуатации системы или гидропневмоагрегата [1].

Целью работы является повышение надежности гидропневмоагрегатов металлорежущего оборудования путем проведения синтеза схем с учетом полученных зависимостей количественных показателей на этапе проектирования.

*Основные положения.* Распределение показателей надежности гидропневмоэлементов подчиняется, в основном, экспоненциальному или нормальному законам. Для совокупности элементов, подчиняющихся экспоненциальному закону, интенсивность отказов элементов и, следовательно, их совокупности является постоянной величиной (не зависит от времени).

Применению экспоненциального закона в определенных случаях способствует то обстоятельство, что с увеличением числа элементов в системе возрастает относительное влияние отказов, подчиняющихся экспоненциальному распределению. Хотя для определенных элементов экспоненциальный закон может и не иметь места, но при замене отказавших элементов новыми (что применяется в гидропневмосистемах) сказывается эффект перемешивания возрастов, и отказы систем в целом будут подчиняться экспоненциальному закону [1].

Наиболее важными с точки зрения надежности свойствами гидропневмоагрегатов являются безотказность и долговечность [2].

В общем случае гидропневмоагрегат может иметь в своем составе источник питания, распределительные устройства, устройства управления, исполнительные механизмы, вспомогательные устройства. Кроме перечисленных функциональных частей агрегат включает пневмолинии (гидролинии), емкости и др. Таким образом, гидропневмоагрегат представляет собой сложную систему взаимосвязанных узлов, элементов и систем. Для анализа надежности сложную систему следует разбить на элементы. Под элементом будем понимать составную часть системы, которую можно охарактеризовать самостоятельно входными и выходными параметрами и для которой достаточно легко можно определить самостоятельные характеристики надежности. Известно, что основные показатели надежности однозначно связаны между собой соответствующими математическими зависимостями. Поэтому достаточно определить некоторые из них. При анализе гидропневмоагрегатов как систем, состоящих из определенного числа элементов, удобно использовать такой показатель, как вероятность безотказной работы, который относится к количественным показателям надежности [1].

Одна из разновидностей анализа функциональной надежности гидропневмоагрегата металлорежущего оборудования – расчет количественных показателей безотказности его отдельных подсистем и функциональных участков. Такая задача особенно актуальна на этапе проектирования гидропневмоагрегатов, когда требуется дать оценку схемной безотказности возможных вариантов структуры проектируемого гидропневмоагрегата (или определить количественные показатели надежности выбранной схемы) и оценить их соответствие заданным требованиям по безопасности работы. Для решения этой задачи целесообразно использовать методику расчета количественных характеристик безотказности изделий гидропневматической техники на этапе проектирования. Расчет количественных показателей безотказности должен предусматривать: проведение анализа влияния характеристик потребителей гидропневмоагрегата на его характеристики и безопасность его работы; оценку влияния отказов элементов функциональных подсистем гидропневмоагрегата на работоспособность потребителей применительно к определенным условиям, режимам и продолжительности работы; выбор метода расчета и определение расчетных соотношений для нахождения количественных характеристик показателей безотказности проектируемого гидропневмоагрегата; расчет количественных показателей безотказности и сравнение их значений с требованиями на проектируемый гидропневмоагрегат.

*Анализ и оценка надежности гидропневмоагрегатов.* Проведем анализ и оценку надежности гидропневмоагрегатов на примере пневмоагрегата, рассмотренного в [3], опираясь на расчет количественных показателей безотказности их отдельных подсистем и функциональных участков. Принимаем экспоненциальный закон распределения, а элементы принимаем невозстанавливаемыми.

Рассмотрим пневмоагрегат загрузочного устройства к токарному станку. Основными количественными показателями безотказности функциональных пневмоагрегатов и их комплектующих являются:

– Вероятность безотказной работы агрегата  $P(t)$  в течение заданного интервала наработки  $t$ . Экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы агрегата в течение заданного интервала наработки  $t$  имеет вид

$$P(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\}, \quad (1)$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов отдельных агрегатов (условная плотность вероятности возникновения отказа агрегата, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник).

Экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы агрегата, состоящей из  $n$ -последовательно соединенных элементов, в течение заданного интервала наработки имеет вид

$$P(t) = \exp\left\{-\sum_1^n \lambda \cdot t\right\}. \quad (2)$$

– Вероятность безотказной работы для системы, состоящей из элементов, имеющих одинаковую среднюю интенсивность отказов, определяется по формуле

$$P(t) = P_3(t)^n, \quad (3)$$

где  $n$  – количество элементов. Данная формула справедлива только для элементов, имеющих одинаковую среднюю интенсивность отказов.

– Общая вероятность безотказной работы системы в течение заданного интервала наработки определяется произведением вероятностей безотказности работы элементов, из которых она состоит и имеет вид

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t). \quad (4)$$

Так как реализация схем пневмоавтоматики проводится с использованием распределительной аппаратуры (распределителей и клапанов) [4], то средняя интенсивность отказов для пневматических распределительных устройств [элементов памяти (ЭП) и элементов, которые реализуют логическую функцию  $\wedge$ ]  $\lambda_{\text{ЭП}} = \lambda_{\wedge} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , а для клапанов [элементов, которые реализуют логическую функцию  $\vee$ ]  $\lambda_{\vee} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$  – данные показатели надежности определяются на основании данных эксплуатации пневмоагрегатов, подобных проектируемому [5].

Описание цикла работы загрузочного устройства к токарному станку в виде графа операций представлено на рисунке.

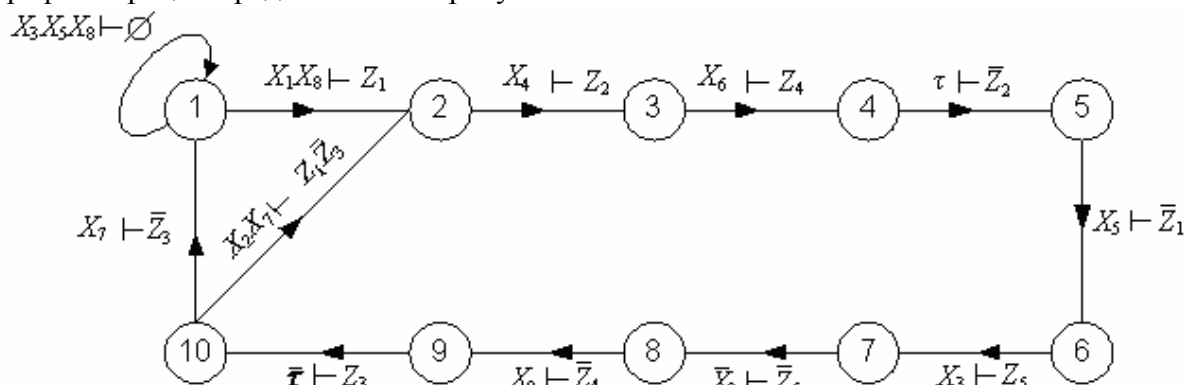


Рис. Ориентированный граф операций

В основу принципа построения схем с использованием стандартной позиционной структуры положен метод построения схемы непосредственно по графу операций [6, 7]. Здесь используется командоаппаратный способ построения. Причем число ЭП командоаппарата выбирается равным числу вершин графа операций. В рассматриваемом примере командоаппарат содержит десять ЭП, десять элементов  $\vee$  и десять элементов  $\wedge$ , т.е. получаем, если  $n$  – количество вершин графа ( $n = 10$ ), то  $n$  – количество ЭП,  $n$  – количество элементов  $\vee$ , и  $n$  – количество элементов  $\wedge$ .

Следовательно, вероятность безотказной работы для последовательно соединенных ЭП, элементов  $\vee$  и элементов  $\wedge$  вычисляем по формуле (2):

$$P_{\text{ЭП}}(t) = \exp\left\{-\sum_1^n \lambda_{\text{ЭП}} \cdot t\right\} = \exp\{-n \cdot \lambda_{\text{ЭП}} \cdot t\};$$

$$P_{\vee}(t) = \exp\left\{-\sum_1^n \lambda_{\vee} \cdot t\right\} = \exp\{-n \cdot \lambda_{\vee} \cdot t\}; \quad P_{\wedge}(t) = \exp\left\{-\sum_1^n \lambda_{\wedge} \cdot t\right\} = \exp\{-n \cdot \lambda_{\wedge} \cdot t\},$$

где  $t$  – интервал наработки,  $t = 3000$  часов.

Тогда, вероятность безотказной работы пневмоагрегата командоаппаратного способа построения определяется по формуле (4):

$$P_{\text{КА}}(t) = P_{\text{ЭП}}(t) \cdot P_{\vee}(t) \cdot P_{\wedge}(t);$$

$$P_{\text{КА}}(t) = \exp\{-t(n \cdot \lambda_{\text{ЭП}} + n \cdot \lambda_{\vee} + n \cdot \lambda_{\wedge})\} = \exp\{-t \cdot n(\lambda_{\text{ЭП}} + \lambda_{\vee} + \lambda_{\wedge})\};$$

$$P_{\text{КА}}(t) = \exp\{-3000 \cdot 10 \cdot (2,7 \cdot 10^{-6} + 2,5 \cdot 10^{-6} + 2,7 \cdot 10^{-6})\} = 0,79.$$

Вероятность безотказной работы командоаппарата составляет 79 %.

Пневмоагрегат также может содержать конечные выключатели (ВК), кнопки «Пуск» и «Стоп», переключатели режимов и промежуточные элементы, используемые для реализации схем гидропневмоавтоматики. Пневмоагрегат также содержит дополнительный наладочный блок, который в рамках данной работы не рассматривается.

В данном случае пневмоагрегат содержит семь ВК, кнопки «Пуск» и «Стоп», переключатель режимов  $X_2$  и два промежуточных элемента  $\wedge$ . Так как вышеперечисленные элементы являются распределительными устройствами, то средняя интенсивность отказов для них равна  $\lambda = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

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.

В данном пневмоагрегате базисом являются семь ВК, кнопки «Пуск» и «Стоп», переключатель режимов  $X_2$ , т.е. базис состоит из десяти элементов, а варьируемая часть пневмоагрегата из двух промежуточных элементов.

Тогда, вероятность безотказной работы для элементов определяется по формуле (1):

$$P_{\text{Э}}(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\};$$

$$P_{\text{Э}}(t) = \exp\left\{-\int_0^{3000} 2,7 \cdot 10^{-6} dt\right\} = 0,992.$$

Вероятность безотказной работы для базиса определяется по формуле (3):

$$P_{\text{Базис}}(t) = P_{\text{Э}}(t)^n,$$

где  $n = 10$  – количество элементов базиса. Данная формула справедлива для элементов, имеющих одинаковую среднюю интенсивность отказов, в данном случае все элементы являются распределительными устройствами.

Следовательно, вероятность безотказной работы для базиса, состоящего из десяти элементов, имеет вид

$$P_{\text{Базис}}(t) = P_{\text{Э}}(t)^{10} = 0,992^{10} = 0,923.$$

Аналогично, вероятность безотказной работы для промежуточных элементов определяется по формуле (3):

$$P_{\text{ПЭ}}(t) = P_{\text{Э}}(t)^m,$$

где  $m = 2$  – количество промежуточных элементов. Данная формула справедлива для элементов, имеющих одинаковую среднюю интенсивность отказов, в данном случае все элементы являются распределительными устройствами.

Таким образом, вероятность безотказной работы для двух промежуточных элементов имеет вид

$$P_{\text{ПЭ}}(t) = P_{\text{Э}}(t)^2 = 0,992^2 = 0,984.$$

Вероятность безотказной работы пневмоагрегата, синтезированного с использованием стандартной позиционной структуры определяется по формуле (4):

$$P_{\text{СПС}}(t) = P_{\text{КА}}(t) \cdot P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t) = 0,79 \cdot 0,923 \cdot 0,984 = 0,72.$$

Следовательно, вероятность безотказной работы пневмоагрегата, реализованного при помощи стандартной позиционной структурной организации, составляет 72 %.

Полученная в результате структурного синтеза система минимизированных логических уравнений имеет вид:  $S_1 = X_2 X_7 + X_1 X_8$ ;  $S_2 = \bar{X}_8$ ;  $Z_1 = X_2 X_7 + X_1 X_8$ ;  $\bar{Z}_1 = X_5 \cdot \tau$ ;  $Z_2 = X_4 \cdot \bar{\tau}$ ;  $\bar{Z}_2 = \tau$ ;  $Z_3 = \bar{\tau} \cdot \bar{y}$ ;  $\bar{Z}_3 = X_2 X_7 + X_7 = X_7$ ;  $Z_4 = X_6$ ;  $\bar{Z}_4 = X_8 \cdot \bar{y}$ ;  $Z_5 = X_3 \cdot \tau y$ ;  $\bar{Z}_5 = \bar{X}_8$  и может быть реализована многими способами. В данном случае был получен пневмоагрегат, содержащий базис, один ЭП и три промежуточных элемента: элемент  $\vee$  и два элемента  $\wedge$ , количество которых, в общем случае, зависит от способов реализации логических функций.

Вероятность безотказной работы для ЭП найдем по формуле (1):

$$P_{\text{ЭП}}(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda_{\text{ЭП}}(t) dt\right\};$$

$$P_{\text{ЭП}}(t) = \exp\left\{-\int_0^{3000} 2,7 \cdot 10^{-6} dt\right\} = 0,992.$$

Вероятность безотказной работы для базиса, состоящего из десяти элементов находится по формуле (3):

$$P_{\text{Базис}}(t) = P_{\text{Э}}(t)^{10} = 0,992^{10} = 0,923.$$

Вероятность безотказной работы для трех промежуточных элементов, состоящих из элемента  $\vee$  и двух элементов  $\wedge$ , определяется по формуле (4):

$$P_{\text{ПЭ}}(t) = P_{\wedge}(t)^m \cdot P_{\vee}(t),$$

где  $m = 2$  – количество элементов  $\wedge$ . Средняя интенсивность отказов для элементов  $\vee$  равна  $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , а для элементов  $\wedge$ :  $\lambda = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

По формуле (1):  $P_{\text{Э}}(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\};$

$$P_{\wedge}(t) = \exp\left\{-\int_0^{3000} 2,7 \cdot 10^{-6} dt\right\} = 0,992;$$

$$P_{\vee}(t) = \exp\left\{-\int_0^{3000} 2,5 \cdot 10^{-6} dt\right\} = 0,993.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы для трех промежуточных элементов имеет вид

$$P_{\text{ПЭ}}(t) = P_{\wedge}(t)^m \cdot P_{\vee}(t) = 0,992^2 \cdot 0,993 = 0,977.$$

Вероятность безотказной работы пневмоагрегата, полученного после минимизации, находится по формуле (4):

$$P_{\text{мин}}(t) = P_{\text{ЭП}}(t) \cdot P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t) = 0,992 \cdot 0,923 \cdot 0,977 = 0,89.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы пневмоагрегата, полученного после минимизации, составляет 89 % и вероятность безотказной работы этого пневмоагрегата выше на 17 %, чем вероятность безотказной работы пневмоагрегата, реализованного командоаппаратным способом.

*Алгоритм расчета количественных показателей безотказности в системах гидропневмоагрегатов.* Проанализировав приведенные выше исследования, можно вывести общие положения для расчета количественных показателей надежности на этапе проектирования для гидропневмоагрегатов, реализованных следующими методами: стандартной позиционной структурой и методом минимизации.

Для гидропневмоагрегатов, реализованных методом стандартной позиционной структуры, алгоритм расчета количественных показателей надежности на этапе проектирования выглядит следующим образом:

1. проводим декомпозицию – разбиваем сложную систему на элементы и рассматриваем количественный и элементный состав командоаппарата, опираясь на граф операций и принципиальную схему гидропневмоагрегата;

2. используя статистические и эксплуатационные данные гидропневмоагрегатов, подобных проектируемым, определяем среднюю интенсивность отказов элементов, входящих в состав агрегата;

3. находим вероятность безотказной работы командоаппарата, используя зависимость:  $P_{\text{КА}}(t) = P_{\text{ЭП}}(t) \cdot P_{\vee}(t) \cdot P_{\wedge}(t)$ . В случаях, рассматриваемых в работе, данная зависимость в общем виде представлена таким образом:  $P_{\text{КА}}(t) = \exp\{-t \cdot n \cdot (\lambda_{\text{ЭП}} + \lambda_{\vee} + \lambda_{\wedge})\}$ ;

4. определяем остальные элементы, входящие в состав гидропневмоагрегата: выделяем базис и промежуточные элементы;

5. рассчитываем вероятность безотказной работы базиса  $P_{\text{Базис}}(t)$  и промежуточных элементов  $P_{\text{ПЭ}}(t)$  (при наличии промежуточных элементов в составе гидропневмоагрегата соответственно), учитывая их элементный состав;

6. находим общую вероятность безотказной работы гидропневмоагрегата, синтезированного с использованием стандартной позиционной структуры по зависимости:  $P_{\text{СПС}}(t) = P_{\text{КА}}(t) \cdot P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t)$ .

Для гидропневмоагрегатов, реализованных методом минимизации, алгоритм расчета количественных показателей надежности на этапе проектирования выглядит следующим образом:

1. проводим декомпозицию – разбиваем сложную систему на составляющие и определяем элементный состав гидропневмоагрегата, опираясь на систему логических уравнений и построенную по ним принципиальную схему данного агрегата;

2. выделяем базис и промежуточные элементы гидропневмоагрегата;

3. рассчитываем вероятность безотказной работы ЭП при наличии его в составе гидропневмоагрегата;

4. находим вероятность безотказной работы базиса  $P_{\text{Базис}}(t)$  и промежуточных элементов  $P_{\text{ПЭ}}(t)$  (при наличии промежуточных элементов в составе гидропневмоагрегата соответственно), учитывая их элементный состав;

5. находим общую вероятность безотказной работы гидропневмоагрегата, синтезированного методом минимизации по зависимости:  $P_{\text{min}}(t) = P_{\text{ЭП}}(t) \cdot P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t)$  – при наличии ЭП в системе или  $P_{\text{min}}(t) = P_{\text{Базис}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t)$  – при отсутствии ЭП (наличие в гидропневмоагрегате ЭП обусловлено содержанием одинаковых наборов во входной последовательности). Поступаем по аналогии, если гидропневмоагрегат не содержит промежуточных элементов или, если гидропневмоагрегат не содержит и ЭП и промежуточные элементы.

*Выводы.* Если расчетные показатели безотказности оказываются ниже требуемых, то определяются узлы и участки гидропневмоагрегата, оказывающие наибольшее влияние на безотказность агрегата в целом, и разрабатываются мероприятия по повышению их надежности. К таким мероприятиям относятся: замена элементов на более надежные; облегчение режимов работы элементов, например перемещение элемента из зоны повышенных температур; резервирование элементов или отдельных участков гидропневмоагрегатов; изменение конструкции или технологии изготовления отдельных деталей и узлов агрегатов, имеющих низкую надежность. При необходимости меняется структура построения функциональных участков гидропневмоагрегатов.

Произведен выбор метода расчета и определение расчетных соотношений для нахождения количественных характеристик показателей безотказности проектируемых гидропневмоагрегатов, реализованных методом стандартной позиционной структуры и методом минимизации, что позволяет проектировать высоконадежные гидропневмоагрегаты нового металлорежущего оборудования.

Оценка показателей надежности гидропневмоагрегатов на этапе эскизного проектирования позволяет осуществить рациональный выбор конструктивной схемы и параметров, подобрать соответствующие материалы и элементы реализаций схем.

**Список литературы:** 1. Кудрявцев А.И. Монтаж, наладка и эксплуатация пневматических приводов и устройств / А.И. Кудрявцев, А.П. Пятидверный, Е.А. Рагулин. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с. 2. Надежность объемных гидроприводов и их элементов / Ю.А. Беленков, М.П. Нейман, М.П. Селиванов и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с. 3. 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 «ХПІ». – 2005. – №29. – С. 95-98. 4. Черкашенко М.В. Синтез логических схем пневмогидроавтоматики. Ч. 1.: Состояние проблемы. Математические модели. Ч. 2.: Методы. Примеры реализации, рекомендации // Інтегровані технології та енергозбереження, 2001. – № 4. – С. 83-91. 5. Сырицын Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода. – М.: Машиностроение, 1981. – 216 с. 6. Черкашенко М.В. Гидропневмоавтоматика. – Харьков: Гидроэлекс, 2002. – 75 с. 7. Черкашенко М.В. Автоматизация проектирования систем гидро- и пневмоприводов с дискретным управлением: Навч. посіб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2001. – 182 с.

© Фатеева Н.Н., 2011  
Поступила в редколлегию 09.02.11