Проведенные расчеты показывают, что для более точного определения термодинамических параметров процессов в турбине и компрессоре необходимо проводить учет изменения показателя адиабаты. Расчет кинематических параметров потока по тракту и проектирование проточной части и лопаток турбин и компрессоров необходимо проводить с учетом переменного показателя адиабаты.

Библиографические ссылки

1. Епифанова В. И. Компрессорные и расширительные турбомашины радиального типа : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998.

2. Конструкция и проектировочный расчет жидкостных ракетных двигателей : учебник для вузов / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин [и др.] ; под общ. ред. Г. Г. Гахунина. М. : Машиностроение, 1989.

3. Нимич Г. В., Михайлов В. А., Бондарь Е. С. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха : учеб. пособие. Киев : Изд-во ИВИК, 2003.

4. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / М. М. Гришутин, А. П. Севастьянов, Л. И. Селезнев [и др.]. Л. : Машиностроение, 1988.

5. Теплофизические свойства фреонов : справ. данные. Т. 1. Фреоны метанового ряда / В. В. Алтунин, В. З. Геллер, Е. К. Петров [и др.] ; под ред. С. Л. Ривкина. М. : Изд-во стандартов, 1980.

N. V. Morozov, V. P. Karasev

STEAM TURBINES WITH LOW-BOILING WORKING MEDIUM

The subject of the article is the cirquit design of a steam-generator plant with a natural working agent. The article suggests an algorithm for calculation of steam turbines with low-boiling working medium, with accounts of the correlation between the adiabatic curve indication and pressure and temperature in the overheated vapor zone.

Keywords: steam turbine, freon, adiabatic curve indicator, low-grade heat, coolant.

УДК 629.7.017

О. Г. Бойко, Л. Г. Шаймарданов

МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ АГРЕГАТОВ

Рассмотрена возможность построения метода расчета надежности систем с индивидуальным резервированием, отличного от традиционного и учитывающего возможность реализации в системе различных сценариев развития отказа.

Ключевые слова: сложные системы, анализ надежности.

В традиционной методике расчета надежности сложных систем используется теорема умножения вероятностей. При последовательном соединении перемножаются вероятности безотказной работы, при параллельном – вероятности отказов агрегатов [1; 2]. Теорема умножения вероятностей получена применительно к вероятностям дискретных событий, и использование ее процедур к интегральным функциям вероятностей отказов агрегатов систем представляется не правомерным [3; 4; 5].

При использовании дискретных значений вероятностей отказов агрегатов теорема умножения вероятностей может быть с успехом применена при решении следующих задач:

– расчет надежности систем при только параллельном и только последовательном соединении агрегатов;

– расчет надежности сложных систем только с общим резервированием.

При индивидуальном резервировании решение задачи расчета надежности сложной системы с использованием традиционного подхода к применению теоремы умножения вероятностей дает завышенные значения вероятности отказа системы. Расмотрим это, а также существо предлагаемого альтернативного метода на примере простейшей системы с индивидуальным резервированием.

Рассматривается система, состоящая из двух последовательно включенных блоков, в каждом из которых, два агрегата соединены параллельно (рис. 1).

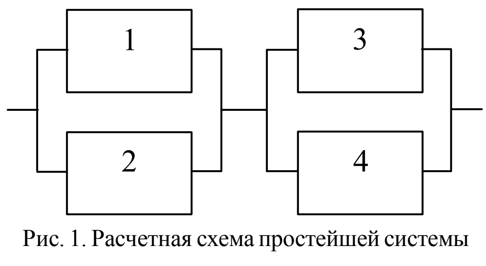

Рис. 1. Расчетная схема простейшей системы

Полагаем, что в системе (рис. 1) все агрегаты одинаковые и имеют параметр потока отказов w. При распределении с равномерной плотностью вероятности, интегральная функция вероятности отказа агрегата имеет вид

$$q(t) = \omega \cdot t.$$

Расчет выполним как того требуют Нормы летной годности самолетов [6] для $t = 1$ ч. Тогда вероятность отказа агрегата за 1 час определится следующим образом:

$$q(1) = \omega \cdot 1.$$

При традиционном подходе к расчету надежности рассматриваемой системы, на первом шаге определяется вероятность отказа одного блока параллельно соединенных агрегатов

$$q_{\text{тр}}^{\text{б}}(1) = \omega^2,$$

и его вероятность безотказной работы

$$p_{\text{тр}}^{\text{б}}(1) = 1 - \omega^2.$$

Вторым шагом определяется вероятность безотказной работы всей рассматриваемой системы

$$P_{\text{тр}}(1) = (1 - \omega^2)^2,$$

и искомая вероятность ее отказа

$$Q_{\text{тр}}(1) = 1 - (1 - \omega^2)^2. \tag{1}$$

Рассматривая построение альтернативного решения задачи расчета надежности, следует отметить, что в простейшей системе (рис. 1) отказ может реализоваться по двум сценариям (последовательностям отказов агрегатов).

При любом сценарии в начале с вероятностью ω отказывает первым любой из агрегатов системы. Пусть это будет агрегат под № 1 (рис. 1). Далее, без учета условных вероятностей, с одинаковой вероятностью ω может отказать любой из трех исправных агрегатов.

При первом сценарии потребуем, чтобы вторым отказал агрегат под № 2. Это возможно с вероятностью $\frac{1}{3}\omega$, поскольку оставалось три исправных агрегата. Тогда вероятность отказа агрегатов № 1 и 2, т. е. вероятность отказа системы по первому сценарию, будет иметь вид

$$Q_{\text{ал}}^{c1}(1) = \frac{\omega^2}{3}. \tag{2}$$

При втором сценарии развития отказа системы потребуем, чтобы после отказа агрегата № 1 с вероятностью ω, отказал один из агрегатов во втором блоке, т. е. агрегат № 3 либо 4. Вероятность реализации этого события $\frac{2}{3}\omega$. После отказа агрегата № 3 либо 4 в системе остаются два последовательно соединенных неотказавших агрегата. Вероятность отказа такой системы в соответствии с теоремой умножения вероятностей рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\text{тр}}^{2,4}(1) = 1 - (1 - \omega)^2.$$

Тогда вероятность отказа рассматриваемой системы по второму сценарию будет иметь вид

$$Q_{\text{ал}}^{c2}(1) = \omega \frac{2}{3} \omega [1 - (1 - \omega)^2]. \tag{3}$$

Для сопоставления полученных результатов примем $\omega = 1 \times 10^{-3}$ и определим следующее:

– по выражению (1) – $Q_{\text{тр}}(1) = 2 \times 10^{-6}$;

– выражению (2) – $Q_{\text{ал}}^{c1}(1) = 3{,}33 \times 10^{-7}$;

– выражению (3) – $Q_{\text{ал}}^{c2}(1) = 1{,}3 \times 10^{-8}$.

Итак, получены три решения для расчета надежности системы с индивидуальным резервированием. В соответствии с этими решениями получены три различных значения вероятности отказа рассматриваемой системы. Ниже обсуждается их правомерность.

Совершенно очевидно, что у систем только с последовательным и только с параллельным соединением агрегатов может быть реализован только один сценарий развития отказа. При последовательном соединении достаточно отказать одному агрегату и система становится неработоспособной. Для потери работоспособности системы с параллельным соединением необходимо, чтобы отказали все ее агрегаты. Это и обеспечивает правомерность применения для расчета их надежности теоремы умножения вероятностей.

Система с общим резервированием сложнее, но и ее отказ реализуется только по одному сценарию. Каждая из параллельно соединенных подсистем, с последовательно соединенными агрегатами, отказывает по единому сценарию. После определения вероятности отказа подсистем, система рассматривается как состоящая только из параллельно соединенных элементов, вероятности отказа которых равны вероятностям отказа подсистем. Для этой системы с параллельно соединенными элементами, также возможен только один сценарий отказа.

При расчете надежности системы с индивидуальным резервированием, при традиционном подходе первым делом определяются вероятности отказов блоков, содержащих параллельно соединенные агрегаты. Это дает возможность привести систему с индивидуальным резервированием к системе с последовательным соединением элементов, вероятности отказа которых равны вероятностям отказов блоков, включающих параллельно соединенные элементы. Затем определяется вероятность отказа системы, содержащей только последовательно соединенные элементы.

В действительности у развитой системы с индивидуальным резервированием возможна реализация многих сценариев развития отказа. Они определят несколько значений вероятностей отказа системы, и отказ системы определится их суммой.

Рассмотрим более общий случай системы с индивидуальным резервированием. Положим, что система содержит n последовательно соединенных блоков, содержащих по $m = 2$ параллельно включенных агрегатов (рис. 2).

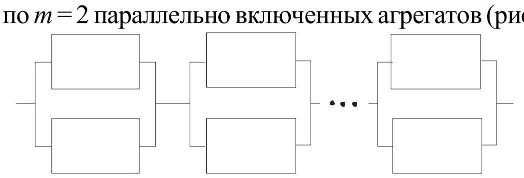

Рис. 2. Система с индивидуальным резервированием

При традиционном подходе вначале определяется вероятность отказа на 1 час блока параллельно включенных агрегатов

$$q_{\text{тр}}^{\text{б}} = \omega^m = \omega^2.$$

Затем система с индивидуальным резервированием (рис. 2) заменяется на систему с последовательно соединенными блоками (рис. 3).

На последнем шаге определяется вероятность безотказной работы системы для n-блоков

$$P_{\text{тр}}\left(1\right)=\left(1-\omega^{2}\right)^{n},$$

и вероятность ее отказа

$$Q_{\text{тр}}\left(1\right)=1-\left(1-\omega^{2}\right)^{n}. \qquad (4)$$

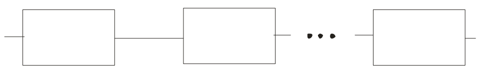

Рис. 3. Приведенная система с индивидуальным резервированием

При последовательном соединении агрегатов либо блоков вероятность отказа (4) системы, определенная в соответствии с традиционным подходом, монотонно возрастает с увеличением n. Вместе с этим следует отметить, что рассматриваемая система состоит из $2n$-агрегатов, имеющих одинаковые вероятности отказов и вполне вероятно, что система может остаться работоспособной при отказе более чем двух агрегатов (по одному в некоторых блоках). Причем для системы вероятность остаться работоспособной в действительности возрастает по мере увеличения n, а вероятность отказа уменьшается.

При альтернативном подходе к расчету надежности рассматриваемой системы предложено рассматривать различные сценарии отказов. Наибольшее значение вероятности отказа дает сценарий, при котором отказывают 2 агрегата в одном блоке. Определим эту вероятность.

Поскольку агрегаты имеют одинаковую вероятность отказа, первым откажет любой из агрегатов с вероятностью w. Поскольку в системе число агрегатов $n\times m$ и принято $m = 2$, то отказ второго агрегата в одном блоке при условии, что первый отказал, возможен с вероятностью

$$q_{\text{тр}}^{\text{б}}(1)=\frac{1}{2n-1}\omega.$$

Тогда вероятность отказа системы при этом сценарии, в соответствии с предлагаемым альтернативным подходом, будет иметь вид

$$Q_{\text{ал}}^{c1}\left(1\right)=\frac{\omega^{2}}{2n-1}. \qquad (5)$$

В соответствии с выражением (5) вероятность отказа системы является убывающей функцией n последовательно соединенных блоков. Другие сценарии развития отказов систем определяют существенно меньшие вероятности, поскольку в зависимости от числа i включенных в сценарий отказавших агрегатов вероятность отказа системы определится следующим образом:

$$Q_{\text{ал}}^{ci}\left(1\right)=\frac{\omega^{i}}{\prod\limits_{j=2}^{i}\left(2n-j-1\right)}. \qquad (6)$$

Покажем это на числовом примере. Положим, что система состоит из $n=10$ последовательно соединенных блоков, включающих по $m=2$ параллельно соединенных агрегатов, параметры потоков отказов ω которых одинаковы и равны 10^{-4}. Это значение ω свойственно низконадежным агрегатам. Вероятности отказов системы при различных сценариях отказов, определяемых числом i отказавших агрегатов, приводящих систему к отказу, будут выглядеть следующим образом:

– при $i=2$ – $Q_{\text{ал}}^{c2}=5,26\times10^{-10}$;
– $i=3$ – $Q_{\text{ал}}^{c3}=2,9\times10^{-15}$;
– $i=4$ – $Q_{\text{ал}}^{c4}=1,72\times10^{-20}$;
– $i=5$ – $Q_{\text{ал}}^{c5}=1,07\times10^{-25}$.

Результаты выполненных расчетов с очевидностью показывают, что вероятности отказов при $i\geq3$ на 5 и более порядков меньше, чем первая вероятность отказа при $i=2$. Это и дает основание не определять сумму всех подобных членов в расчетах надежности систем.

Из (6) следует, что при всех сценариях развития отказов в системе, вероятность ее отказа уменьшается при увеличении n. Характер изменения $Q_{\text{ал}}^{c1}\left(1\right)$ противоположен характеру изменения $Q_{\text{тр}}\left(1\right)$.

Изложенное обеспечивает возможность сформулировать правило расчета надежности сложных систем.

Если в сложной системе использовано общее и индивидуальное резервирование агрегатов, последовательно соединенных ветвей агрегатов, и в процессе расчета вероятности отказа резервированных ветвей с последовательным соединением получено не более одного блока с параллельно соединенными элементами, то правомерно продолжение расчета с использованием теоремы умножения вероятностей. Если получено более одного последовательно соединенного блока резервированных элементов, то необходимо рассматривать возможные сценарии реализации отказа системы.

На самолетах гражданской авиации используются функциональные системы, как с общим, так и с индивидуальным резервированием. При этом, вследствие сложности систем, их отнесение к тому либо другому типу резервирования, а, следовательно, и построение процедуры расчета надежности требуют предварительного анализа. Рассмотрим с этих позиций структуру системы кондиционирования воздуха (СКВ) самолета Ту-154 М.

Расчетная схема СКВ, составленная на основе ее функциональной схемы, приведена на рис. 4.

Не расшифровывая наименования и назначение агрегатов, отметим, что участок I включает агрегаты системы отбора воздуха от трех авиадвигателей, участок II – агрегаты ветвей правого и левого борта самолета системы регулирования давления наддува воздуха, участок III –

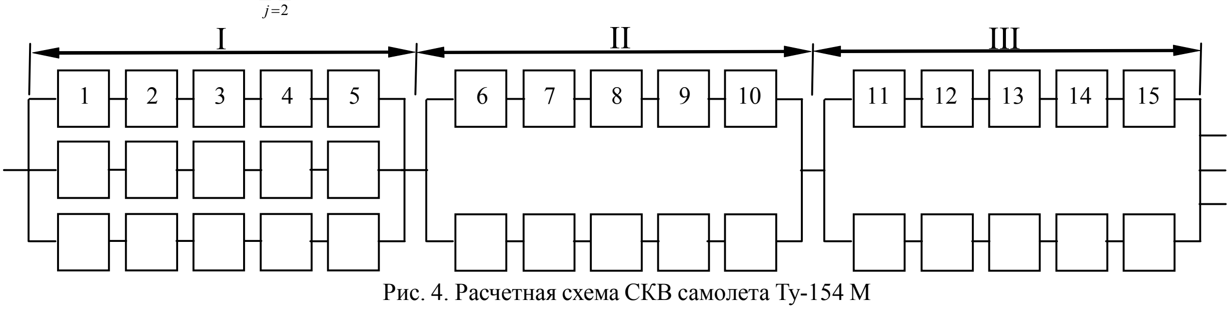

Рис. 4. Расчетная схема СКВ самолета Ту-154 М

агрегаты системы регулирования температуры воздуха в салонах и в кабине экипажа.

После расчета вероятностей отказа отдельных систем на участках I, II и III, расчетная схема СКВ представлена на рис. 5.

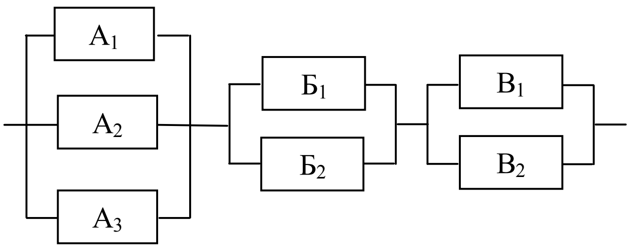

Рис. 5. Расчетная схема СКВ Ту-154 М

На схеме, приведенной на рис. 5, элементы *А* имеют значения вероятности отказа системы из последовательно соединенных агрегатов под номерами 1–5 (рис. 4), элементы *Б* – агрегатов под номерами 6–10, и элементы *В* – агрегатов под номерами 11–15. Таким образом, расчет СКВ сведен к расчету системы с индивидуальным резервированием. Как показано выше, задача расчета такой системы не может быть решена с использованием традиционного методологического подхода, использующего теорему умножения вероятностей. При ее решении необходимо учитывать возможные сценарии развития процесса отказов агрегатов.

Если в системе СКВ положить параметры элементов *А*, *Б* и *В* равными 1×10^{-5}, что весьма близко к действительности, то вероятность ее отказа, при последовательностях отказов агрегатов будут иметь следующие значения:

– при $Б_1$, $Б_2$ либо $В_1$, $В_2$ – $Q_{\text{ал}}(Б_2/Б_1) = Q_{\text{ал}}(В_2/В_1) = 9{,}5\times10^{-10}$;

– $Б_1, В_1, Б_2$ – $Q_{\text{ал}}(Б_2/Б_1В_2) = 1{,}9\times10^{-14}$;

– $А_1, А_2, А_3$ – $Q_{\text{ал}}(А_3/А_1А_2) = 2{,}2\times10^{-14}$;

– традиционном подходе с использованием теоремы умножения вероятностей – $Q_{\text{тр}} = 8\times10^{-10}$.

В заключение следует отметить, что принципиальным отличием предлагаемого подхода к расчету надежности систем, учитывающего возможные сценарии развития отказов в системах с индивидуальным резервированием, является уменьшение вероятности отказа систем по мере увеличения числа последовательно соединенных блоков с индивидуальными резервированными агрегатами. При традиционном подходе к расчету надежности рассматриваемых систем увеличение числа последовательно соединенных блоков с резервированными агрегатами приводит к возрастанию вероятности отказа систем, что, как показано в работе, не соответствует действительности.

Библиографические ссылки

1. Вентцель Е. С. Теория вероятности. М. : Физмат, 1962. 563 с.

2. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория Вероятностей и ее инженерные приложения. М. : Наука, 1988.

3. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Математические модели и методы расчета схемной надежности функциональных систем самолетов ГА // Вестник СибГАУ. Вып. 20. 2008. С. 78–82.

4. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Методологические особенности расчетов надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации // Вестник СибГАУ. Вып. 17. 2007. С. 120–125.

5. Бойко О. Г. Анализ традиционного и разработка альтернативного методологического подхода к расчету надежности сложных систем // Наука и технологии. Итоги диссертационных иследований. Т 1. Избранные труды Российской школы. М. : РАН, 2009. С. 326–36.

6. АП-25. Авиационные правила. Нормы летной годности. М. : МАК, 1994.

O. G. Boyko, L. G. Shaimardanov

RELIABILITY CALCULATION SPECIALTIES FOR SYSTEMS WITH INDIVIDUAL RESERVING

The possibility of development of the method of reliability calculation for systems with individual reserving is considered. This method differs from the traditional. It takes into account the possibility of realization in the system of breakdown development.

Keywords: complex systems, security analysis.