

УДК 629.7.015.4-192

А.М. АРАСЛАНОВ, Б.Г. МИНГАЗОВ

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Россия

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

В предположении случайного характера взаимодействия конструкции с окружающей средой, предлагается методология проектирования элементов конструкции с предписанной надежностью.

надежность, проектирование конструкций, наработка на отказ

Введение

В практике модернизации старых и создании новых конструкций двигателей часто возникает необходимость иметь некоторые оценки для надежности, интенсивности отказов и средней наработки на отказ для проектируемых элементов конструкций.

При этом было бы желательно широкое использование имеющихся данных по экспериментальным данным предшествующих аналогов. Также интересна задача обратная вышеупомянутой, в которой требуется определить проектные параметры вновь конструируемого элемента конструкции, который на этапе проектирования имел бы необходимый уровень надежности и средней наработки на отказ.

Для лучшего понимания идеи предлагаемого подхода и прозрачности рассуждений в качестве модели для закона изменения надежности во времени принята широко используемая простейшая модель в виде экспоненциального закона $H(t) = e^{-\lambda t}$. В качестве модели для определения надежности в любой момент времени принята модель “нагрузка-прочность”.

Результаты исследований

Рассмотрим вопросы нахождения параметров закона изменения надежности во времени по экспоненциальному закону типа

$$H(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

для вновь создаваемого элемента изделия по известным параметрам аналогичного закона предшествующего прототипа. Пусть для этого прототипа элемента изделия этот закон известен и представляет собой

$$H_1(t) = e^{-\lambda_1 t}, \quad (2)$$

где параметр λ_1 известен из многолетнего опыта эксплуатации прототипа.

Пусть для вновь создаваемого изделия этот закон имеет вид

$$H_2(t) = e^{-\lambda_2 t}, \quad (3)$$

где λ_2 неизвестен и подлежит определению.

Прологарифмируем обе части вышеописанных выражений (2) и (3):

$$\lg H_2 = -\lambda_2 t \lg e;$$

$$\lg H_1 = -\lambda_1 t \lg e.$$

Их отношение будет выглядеть как

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\lg H_2}{\lg H_1},$$

т.е.
$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\lg H_2}{\lg H_1}. \quad (4)$$

В этом соотношении H_1 и H_2 – надежности, закладываемые в прототип и новое изделие при проектировании. Для их определения можно воспользоваться подходами, изложенными в широко извест-

ных работах [1, 2], где приведены многочисленные графики и аналитические выражения, практически для всех возможных комбинаций законов распределения вероятностей нагрузки и несущей способности, или в общем случае, “входа” системы и границ области допустимых значений параметра поведения изделий (“выхода” системы).

Учитывая, что средняя наработка на отказ для экспоненциального закона определяется как

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (5)$$

то, имея в виду (4), для средней наработки на отказ вновь создаваемого элемента изделия имеем

$$T_{2cp} = T_{1cp} \frac{\lg H_1}{\lg H_2}. \quad (6)$$

Можно поставить и другую задачу: какую надежность H_2 нужно заложить на этапе проектирования вновь создаваемого элемента изделия, чтобы обеспечить заданную наработку на отказ $T_{зад}$, при известной средней наработке на отказ T_{1cp} .

Из (6) следует

$$\lg H_2 = \frac{T_{1cp}}{T_{зад}} \lg H_1, \quad (7)$$

так как $T = \frac{1}{\lambda}$, или

$$\lg H_2 = \frac{\lambda_{зад}}{\lambda_1} \lg H_1. \quad (8)$$

Поясним процедуру определения $\lambda_2(T_{2cp})$, а также необходимый уровень закладываемой при проектировании надежности H_2 для нового изделия на примерах.

Пример. Пусть для прототипа изделия U1 в качестве расчетной модели взята сферическая тонкостенная оболочка радиуса $r = 1$ м, толщиной $\delta = 0,001$ м. Внутреннее давление внутри оболочки случайно с нормальным законом распределения и параметрами $m_q = 0,133$ МПа, $\sigma_q = 0,0133$ МПа. Несущая способность материала конструкции также

случайна с нормальным законом распределения с параметрами $m_R = 200$ МПа, $\sigma_K = 20$ МПа. При таких параметрах нагрузки q и несущей способности R , и толщины оболочки δ надежность, заложенная в изделие, можно определить следующим образом.

Напряжения в стенке конструкции S равны

$$S = \frac{qr}{\delta} = \frac{q1}{0,001} = 1000q,$$

отсюда

$$m_s = 133 \text{ МПа}; \quad \sigma_q = 13,3 \text{ МПа}.$$

Надежность оболочки равна

$$H_1 = \Phi(\gamma_1),$$

где Φ – функция Лапласа.

$$\gamma_1 = \frac{m_{R-s}}{\sigma_{R-s}} = \frac{m_R - m_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} = \frac{n-1}{\sqrt{A_R^2 + n^2 A_s^2}},$$

где $n = \frac{m_R}{m_s}$; $A_R = \frac{\sigma_R}{m_R}$; $A_s = \frac{\sigma_s}{m_s}$.

Для наших данных $n = 1,5$; $A_R = 0,1$; $A_s = 0,1$:

$$\gamma = \frac{1,5-1}{\sqrt{0,01+1,5^2 \cdot 0,01}} = 2,77.$$

По таблицам находим:

$$H_1 = \Phi(2,77) = 0,9972;$$

$$\lg H_1 = -0,001217.$$

Пусть для вновь создаваемого изделия все параметры те же, но взят другой материал, т.е. вместо ХН7010 с $m_R = 200$ МПа, $\sigma_K = 20$ МПа взята сталь ХН60В с $m_R = 230$ МПа, $\sigma_K = 23,0$ МПа.

Тогда для вновь создаваемого изделия

$$n = 230/133 = 1,725;$$

$$\gamma_2 = \frac{1,725-1}{\sqrt{0,01+1,725^2 \cdot 0,01}} = 3,63604;$$

$$H_2 = \Phi(3,63604) = 0,99986;$$

$$\lg H_2 = -0,0000608.$$

Тогда

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\lg H_2}{\lg H_1} = \frac{-0,0000608}{-0,001217} = 0,05.$$

Таким образом, для вновь издаваемого изделия можно прогнозировать λ_2 как

$$\lambda_2 = 0,05\lambda_1;$$

Пусть по экспериментальным данным для прототипа $\lambda_1 = 10^{-4}$ час⁻¹; тогда

$$\lambda_2 = 0,05 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ час}^{-1}$$

или в средних наработках на отказ;

$$T_1 = \frac{1}{\lambda_1} = 10^4 \text{ час};$$

$$T_2 = \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \cdot 10^6 \text{ час}.$$

Таким образом, использование нового материала может дать существенное увеличение наработки на отказ.

Задача. Как спроектировать новые изделия, которое по прогнозу имело бы заданную наработку на отказ $T_{зад}$?

Пусть $T_{зад.ср} = 10^7$. Для прототипа имеем $\lambda_1 = 10^{-4}$, т.е. $T_{1.ср} = 10^4$ час.

Выше было получено, что надежность, закладываемая в проектируемое изделие, которое обеспечивает $T_{зад}$, можно определить как

$$\lg H_2 = \frac{T_{1.ср}}{T_{зад}} \cdot \lg H_1.$$

У нас $H_1 = 0,9972$; $\lg H_1 = -0,001217$, тогда

$$\lg H_2 = \frac{10^4}{10^7} \cdot (-0,001217) = -1,217 \cdot 10^{-6};$$

$$H_2 = 10^{-1,217 \cdot 10^{-6}} = 0,999997197.$$

Следовательно, необходимая средняя наработка на отказ будет обеспечена, если заложить в проектируемое изделие надежность равную H_2 .

Это можно сделать двумя путями:

а) увеличение величины несущей способности, т.е. m_R (либо новый материал, либо какой то способ увеличения m_R старого материала):

$$\Phi(\gamma) = 0,999997197,$$

тогда $\gamma = 4,54$;

$$\gamma = \frac{n-1}{\sqrt{A_R^2 + n^2 \cdot A_S^2}} = 4,54;$$

$$n^2 - 2,52n + 1 = 0;$$

$$n = 2,02.$$

Тогда $m_{R\text{ннеоб}} = n \cdot m_s = 2,02 \cdot 133 = 268,66$ МПа;

в) второй путь связан с уменьшением действующих напряжений, путем увеличения толщины облочки:

$$m_{S\text{ннеоб}} = \frac{m_R}{n} = \frac{230}{2,02} = 113,86 \text{ МПа};$$

$$m_{S\text{ннеоб}} = \frac{m_q \cdot r}{\delta_{\text{необх}}} = 113,86;$$

$$\frac{0,133 \cdot 1}{\delta_{\text{необх}}} = 113,86;$$

$$\delta_{\text{необх}} = 0,001168 \text{ м}.$$

Вывод

Таким образом, рассмотренный метод позволяет оценить надежность изделия с учетом изменения свойств материала по наработке.

Литература

1. Арасланов А.М. Расчет элементов конструкций при случайных нагрузках. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
2. Капур А., Ламберсон А. Надежность и проектирование систем. – М.: Машиностроение, 1980. – 250 с.

Поступила в редакцию 1.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Р.И. Адгамов, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань.