

УДК 621.45.01; 62-192

В. А. ГАБРИНЕЦ¹, С. М. ПОДОЛЬЧАК²¹ Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, Украина² Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБРАННОЙ ПРОГРАММЫ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Проведена сравнительная оценка рассмотренных программ ускоренных испытаний и сделан выбор оптимальной программы испытаний, которая наиболее рациональна с точки зрения выбранного показателя надежности. Предложен подход к определению эффективности выбранной программы испытаний по различным критериям: по показателям надежности и по точности проведения испытаний. Обоснован принятый и рассмотренный закон распределения показателей надежности. Так как метод оценки достаточно прост и не требует громоздких вычислений, то применение данного подхода существенно упрощает поиск оптимальной программы ускоренных испытаний с целью достижения наибольшей эффективности по определенному показателю надежности.

Ключевые слова: ускоренные испытания, показатель надежности, ракетный двигатель, наработка на отказ, программа испытаний, точность проведения испытаний.

Введение

Одной из важнейших задач в современном ракетном двигателестроении является обеспечение высокой надежности как отдельных узлов и агрегатов, так и самого ракетного двигателя (РД) в целом. Надежность РД закладывается на этапе проектирования и подтверждается в процессе экспериментальной отработки. Весь процесс экспериментальной отработки РД делится на два этапа – наземные испытания (автономные и огневые) отдельных узлов и агрегатов РД и летные испытания самого двигателя в составе ракеты. Такое деление с точки зрения обеспечения и оценки надежности имеет принципиальное значение. Получение необходимых сведений для оценки надежности при наземных испытаниях требует меньших затрат, чем при летных. Поэтому как можно более полное воспроизведение натуральных воздействий при наземных испытаниях с целью получения объективных оценок надежности является одной из основных задач, решаемых при наземной отработке элементов и систем РД [1].

Начальный период каждого этапа отработки связан, как правило, с доработками конструкции отработываемого объекта (доводочные испытания). Предполагается, что последовательно проводимые доработки объекта приводят к росту надежности. Начальный же уровень надежности изделия зависит от того, насколько удачно проведен предыдущий этап отработки. Зависимости изменения надежности изделия на этапе доводочных испытаний от порядкового номера испытания называют кривыми роста

надежности [2].

После завершения доводки конструкции проводится определенное число контрольных испытаний штатного варианта объекта с целью подтверждения его надежности, которая в ходе этих испытаний предполагается неизменной. Задача в этом случае сводится к получению необходимого статистического материала, используемого для вычисления надежности. По результатам испытаний надежность представляется в виде ее оценок и доверительных интервалов этих оценок. Повышение достоверности оценок надежности по результатам контрольных испытаний связано с увеличением их числа.

В настоящее время, когда происходит переход предприятий на рыночные отношения, проблема повышения эффективности испытаний становится все более актуальной. Дорогостоящее оборудование испытательных стендов и комплексов, затраты на проведение испытаний и стоимость разрабатываемых изделий вынуждают разрабатывать новые методы контроля испытаний, их проведения и повышения надежности изделий.

Для уменьшения объема выборки, необходимого для подтверждения уровня надежности двигателей, применяют способы объединения информации, методы теории подобия и др.

Сокращение времени получения требуемой информации по результатам стендовых испытаний и ускорение доводки изделий на заданный ресурс позволяет проведение ускоренных испытаний, которые позволили бы эффективно выявлять конструк-

тивно-производственные дефекты, проявления которых связаны с наработкой на отказ.

Постановка задачи исследования

Определим количество двигателей, которые необходимо испытать для того чтобы добиться требуемого уровня надежности по результатам испытаний на отказ.

Из теории надежности нам известно, что наработка на отказ подчиняется экспоненциальному закону распределения, согласно которому, необходимое количество двигателей для испытаний определяется из соотношения

$$n_{\text{тр}} = \frac{a}{1 - P_n} - \frac{a - m}{2},$$

где a – половина аргумента функции χ^2 ;

m – допустимое в процессе испытаний количество отказов, которое указывается в ТУ на разрабатываемый двигатель;

P_n – нижнее граничное значение вероятности безотказной работы двигателя.

Как показывают теоретические расчеты, требуемое количество опытных образцов двигателей стремительно возрастает при увеличении значения нижней границы вероятности безотказной работы (рис.1). Расчеты проводились при заданном уровне риска заказчика $\beta = 0,1$ и при допустимом количестве отказов $m = 1 \dots 3$. При уменьшении уровня риска заказчика количество опытных образцов увеличится.

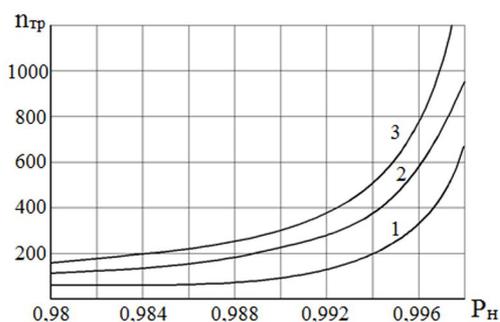


Рис. 1. Зависимость требуемого количества испытываемых двигателей от нижнего граничного значения вероятности безотказной работы при $\beta = 0,1$:

$$1 - m = 1; 2 - m = 2; 3 - m = 3$$

Для того, чтобы уменьшить количество испытываемых двигателей, а, следовательно, и количество самих испытаний, необходимо выбрать такую программу испытаний, по которой можно было бы провести испытания как можно меньшего объема

выборки, получив при этом достаточное количество информации.

Решить эту проблему позволяют методы ускоренных испытаний. Под ускоренными испытаниями понимают испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации в более короткие сроки, чем в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации. Ускорение режимов и времени проведения испытаний характеризуется коэффициентом ускорения

$$k_y = \frac{t_n}{t_y},$$

где t_n – продолжительность испытаний в нормальном режиме;

t_y – продолжительность испытаний в ускоренных режимах.

Под коэффициентом ускорения понимают отношение времени испытаний в обычных условиях t_n к времени испытаний в ускоренных режимах t_y при условии равенства значений вероятностей безотказной работы в обоих случаях.

Основное требование, предъявляемое к ускоренным испытаниям – идентичность процессов старения и износа по отношению к испытаниям в нормальных условиях, что означает идентичность законов распределения отказов.

Планирование и проведение ускоренных испытаний в настоящее время становятся все более важными, так как одновременно с усовершенствованием конструкций возрастают требования к их надежности. Преимущества, которые можно реализовать от проведения ускоренных испытаний:

- сокращение периода создания и доводки новых двигателей;
- сокращение времени и затрат на проведение испытаний;
- ускорение внедрения мероприятий по увеличению надежности двигателей в процессе производства [3].

1. Выбор программы испытаний

Рассмотрим метод ускоренных испытаний, который заключается в наработке на отказ, то есть, испытания проводятся до первого отказа или до истечения заданного времени наработки.

При выборе программы испытаний будем исходить из следующих соображений:

- в качестве оценки эффективности программы испытаний выберем показатели надежности,

характеризующие среднюю наработку до отказа T_{cp} и интенсивность отказов λ ;

– отказавшие в ходе испытаний двигатели не заменяют и не восстанавливают;

– испытания прекращают при достижении заданной наработки или заданного количества отказов.

Этим соображениям отвечают две программы испытаний – [NUr] и [NUz], в которых:

N – объем выборки изделий, предназначенных для испытаний;

U – планы испытаний, в которых отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются;

r – количество отказов, при котором происходит окончание испытаний;

z – наработка каждого z_i двигателя, окончание испытаний происходит при условии $\min(t_i, \tau_i)$ [4].

Условие $\min(t_i, \tau_i)$ означает, что испытание закончится в случае если пройдет наработка на отказ i -го двигателя (t_i) или пройдет наработка до снятия с испытаний i -го работоспособного двигателя (τ_i).

В нашем случае программа испытаний [NUr] – это испытания без замены отказавших двигателей и прекращением после отказа заданного количества двигателей, а программа [NUz] – испытания без замены отказавших двигателей и прекращением после заданного количества отказов или наработки до снятия с испытаний заданного количества работоспособных двигателей.

2. Определение эффективности программы испытаний

Предложенные показатели надежности, характеризующие среднюю наработку до отказа T_{cp} и интенсивность отказов λ , имеют экспоненциальное распределение с плотностью распределения

$$f = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Функция распределения представлена на рис.2 и определяется из выражения

$$F = \int_0^t f(t)dt = 1 - \lambda e^{-\lambda t}.$$

Параметром экспоненциального распределения является интенсивность отказов

$$\lambda_i = \frac{m_i}{\left(n - \sum_{i=1}^n m_{i-1} \right) \cdot \Delta t_i},$$

где m_i – количество отказавших двигателей в промежутке времени Δt_i ;

n – количество испытываемых двигателей;

Δt_i – промежуток времени, в течение которого произошел отказ двигателя.

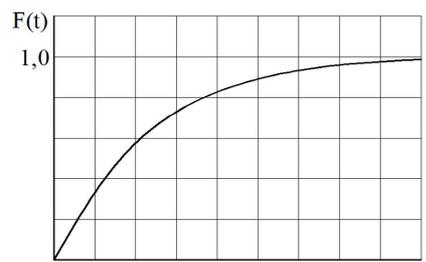


Рис. 2. Функция распределения экспоненциального закона

Сравним средние продолжительности испытаний для программ [NUr] и [NUz].

Так как количество отказавших двигателей во время испытаний r должно быть меньше общего количества испытываемых двигателей N, то справедливо неравенство

$$\frac{r}{N} < 1. \tag{1}$$

Для программы испытаний [NUr] средняя продолжительность испытаний равна

$$T_{cp}^{NUr} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N-r}. \tag{2}$$

Для программы испытаний [NUz] средняя продолжительность испытаний равна

$$T_{cp}^{NUz} = \frac{1}{\lambda} (\ln N + C), \tag{3}$$

где $\hat{\lambda} = \lambda + \mu$ – параметр экспоненциального распределения наработки на отказ по программе [NUz], учитывающий условие $\min(t_i, \tau_i)$;

μ – параметр экспоненциального распределения наработки на отказ по программе [NUz];

C = 0,5772 – постоянная Эйлера.

Сопоставив (2) и (3), получаем следующее соотношение

$$\frac{T_{\text{cp}}^{\text{NUz}}}{T_{\text{cp}}^{\text{NUr}}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{\ln N + C}{\ln \frac{N}{N - r}}. \quad (4)$$

Введем понятие степени цензурирования, т.е. показателя, который характеризует событие, приведшее к прекращению испытания до наступления отказа

$$v = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{N}$$

и с учетом этого перепишем выражение (4):

$$\frac{T_{\text{cp}}^{\text{NUz}}}{T_{\text{cp}}^{\text{NUr}}} = v \frac{\ln N + C}{\ln \frac{1}{1 - v}}. \quad (5)$$

Так как по программе испытаний $v < 1$, то можно определить для какого количества испытываемых двигателей N будет эффективнее та или иная программа испытаний.

При сравнении выбранных программ испытаний установлено, что при $N \geq 6$ эффективнее с точки зрения продолжительности проведения испытаний будут испытания, проводимые по программе [NUr], так как правая часть равенства (5) будет при этом больше 1, а это значит, что средняя продолжительность испытаний будет больше по программе [NUz].

Рассмотрим теперь эффективность выбранных программ с точки зрения точности проведения ускоренных испытаний по данным программам.

При оценке средней наработки на отказ на испытания ставится один или несколько двигателей, которые испытывают в течение некоторого времени

$$T_r = t_1 + t_2 + \dots + t_i + t_r,$$

где t_i - время наработки между $(i+1)$ -м и i -м отказами;

r - количество отказов.

Учитывая риски заказчика и производителя, введем следующие обозначения наработки на отказ:

T_{min} - минимально допустимое значение наработки на отказ, при которой партия должна приниматься заказчиком с риском, не превышающим β ;

T_0 - значение наработки на отказ, при котором партия должна приниматься с вероятностью $(1 - \alpha)$, где α - риск производителя.

Принимая во внимание, что случайная величина вида $\frac{2T_r}{T}$ подчиняется распределению χ^2 , так

как при 2-х степенях свободы распределение χ^2 будет совпадать с рассматриваемым нами экспоненциальным распределением, то условия для принятия партии по результатам испытаний запишутся в виде:

- для программы испытаний [NUr]

$$\frac{2r}{\chi_{1-\alpha}^2(2r)} = \delta_r + 1; \quad (6)$$

- для программы испытаний [NUz]

$$\frac{2N}{\chi_{1-\alpha}^2(2N)} = \delta_N + 1, \quad (7)$$

где δ_r и δ_N - погрешности проведения испытаний согласно соответствующим программам [NUr] и [NUz];

$\chi_{1-\alpha}^2(2r)$ и $\chi_{1-\alpha}^2(2N)$ - квантили распределения χ^2 с числом степеней свободы $2r$ и $2N$ соответственно [5].

Так как квантили в уравнениях (6) и (7) имеют одинаковое число степеней свободы, то, следовательно, будут иметь и одинаковые значения.

Нетрудно теперь заметить, что так как $N > r$, то как видно из (6) и (7) и $\delta_N > \delta_r$. Следовательно, испытания, проводимые по программе [NUz] будут иметь большую погрешность, чем испытания, проводимые по программе [NUr].

Получается, что испытания, проводимые по программе [NUr] будут более эффективными, чем испытания, проводимые по программе [NUz] и с точки зрения точности проведения испытаний.

Заключение

Рассмотрена задача выбора программы испытания на примере сравнения двух программ и сделана оценка эффективности программ испытаний по средней продолжительности испытаний, а также интенсивности появления отказов во время испытаний.

Предложен один из подходов выбора наиболее рациональной и эффективной программы испытаний по критерию точности проведения испытаний, проводимых по отработке на отказ двигателя.

На основании данного подхода сделан первоначальный задел для сравнительного анализа программ ускоренных испытаний по другим критериям и пока-

зателям надежности.

Возможен также и логико-вероятностный анализ существующих программ, как ускоренных испытаний, так и испытаний на нормальных режимах работы. В данном направлении исследования будут продолжены.

Литература

1. Пронь, Л. В. *Методологічні основи випробувань ракетних двигунів [Текст] : навч. посібник / Л. В. Пронь, С. М. Подольчак. – Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2003. – 92 с.*

2. Габринец, В. А. *Вероятностный анализ взаимодействия системы аварийной защиты и ракетного двигателя при стендовых испытаниях [Текст] / В. А. Габринец, С. М. Подольчак // Про-*

блемы высокотемпературной техники : сб. науч. тр. Днепропетр. нац. ун-та им. О. Гончара. – Днепропетровск : Пороги, 2013. – С. 25 – 31.

3. *Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения [Текст] / Методические указания ГОССТАНДАРТА РД 50-424-83. – М. : Изд. Стандартов, 1984. – 12 с.*

4. *Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность [Текст] / ГОСТ 27.410-87. – М. : Изд. Стандартов, 1988. – 109 с.*

5. Труханов, В. М. *Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний опытных образцов [Текст] / В. М. Труханов. – М. : Машиностроение, 2003. – 320 с.*

Поступила в редакцию 8.12.2014, рассмотрена в редколлегии 20.01.2015

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРАНОЇ ПРОГРАМИ ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ

В. О. Габрінець, С. М. Подольчак

Проведено порівняльну оцінку розглянутих програм прискорених випробувань і зроблено вибір оптимальної програми випробувань, яка найбільш раціональна з точки зору обраного показника надійності. Запропоновано підхід до визначення ефективності обраної програми випробувань за різними критеріями: за показниками надійності та за точністю проведення випробувань. Обґрунтовано прийнятий і розглянутий закон розподілу показників надійності. Так як метод оцінювання достатньо простий і не потребує громіздких обчислювань, то використання даного підходу істотно спрощує пошук оптимальної програми прискорених випробувань з метою досягнення найбільшої ефективності за певним показником надійності.

Ключові слова: прискорені випробування, показник надійності, ракетний двигун, напрацювання на відмову, програма випробувань, точність проведення випробувань.

PERFORMANCE EVALUATION OF SELECTED PROGRAM OF ACCELERATED TESTS

V. A. Gabrinets, S. M. Podol'tchak

A comparative evaluation of the programs reviewed accelerated tests and make choice of optimal test program, which is the most rational from the point of view of the selected indicators of reliability. An approach to determine the effectiveness of the selected test program according to different criteria: in terms of reliability and accuracy testing. Informed decision and considered the law of distribution reliability indices. Since the method of estimation is fairly simple and does not require cumbersome calculations, the use of this approach greatly simplifies the search for the best program of accelerated tests in order to be most effective for a particular indicator of reliability.

Key words: accelerated testing, the reliability index, rocket engine, time between failures, programs of tests, accuracy testing.

Габринец Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрой теплотехники, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна, Днепропетровск, Украина.

Подольчак Сергей Михайлович – старший преподаватель кафедры двигателестроения, Днепропетровский национальный университет им. Олесья Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: s.mihalych@mail.ru.