

УДК 629.76.762.5

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ АВИАЦИОННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье рассматриваются вопросы моделирования испытаний с учетом минимизации затрат по обеспечению требуемого уровня надежности изделий.

Ключевые слова: ракетный двигатель (РД), экспериментальная отработка, надежность, закон распределения случайной величины, программа обеспечения надежности двигателя, стоимость отработки системы, экономический эффект, предварительные испытания, государственные стендовые испытания.

A.G. Shadanov, P.G.

THE PROBLEM OF RELIABILITY IN AIRCRAFT ROCKET ENGINES TESTING

The article deals with the simulation evaluation test with a view to minimizing over-spending to ensure the required reliability level of the products.

Key words: rocket engine, experimental testing, reliability, the law of the random variable, the program ensuring the engine reliability, economic benefits, pre-tests, state benchmark tests.

Введение

Опыт участия специалистов НИО государственного заказчика в военно-научном сопровождении опытно-конструкторских работ по созданию авиационных ракетных двигателей и проведения их испытаний показывает, что для сложных систем и их элементов характерна связь между структурой системы, проектными параметрами ее элементов, требуемым уровнем надежности и затратами средств на ее экспериментальную отработку.

Затраты средств на экспериментальную отработку основных элементов системы составляют обычно большую часть затрат на создание изделия. С целью экономии средств на создание системы при проектировании следует выбирать такие ее структуру и характеристики, а также методы их оценки, которые бы давали возможность минимизировать затраты.

Цель исследования

Определение модели испытаний авиационных ракетных двигателей (РД).

Объект исследования

Объектом исследования является ракетный двигатель однократного применения, который в процессе функционирования может находиться в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном.

Методы исследования

Ввиду большой размерности задачи выбора оптимального варианта системы и планирования экспериментальных работ данный вопрос решается с помощью ПЭВМ с необходимым программным обеспечением с помощью различных моделей и методов [2].

Используются методы инженерного (качественная оценка) и вероятностно-статистического анализа (количественная оценка).

Метод инженерного анализа используется для оценки безотказности образца, когда исходные данные при испытаниях получены в ограниченном количестве экспериментов (опытов) и/или на одном экземпляре образца. При этом оценка сводится к выводу «да – нет»

(образец выдержал или не выдержал испытания). Метод может использоваться и в других случаях, когда по располагаемым исходным данным выполнить количественную оценку безотказности не представляется возможным.

Метод вероятностно-статистического анализа является расчетно-экспериментальным и используется в случаях, когда исходные данные, необходимые для определения количественных значений вероятностных показателей безотказности как статистических характеристик, содержат объем информации в соответствии с определениями [1]:

– ограниченный объем статистической информации о работоспособности образца продолжительного действия: массив информации, содержащий, наряду с другими данными, сведения о количестве отказов экземпляров ракетного двигателя, произошедших за рассматриваемый промежуток испытаний, а также сведения о суммарной наработке экземпляров зачетной выборки на момент окончания испытаний двигателя;

– достаточный объем статистической информации о работоспособности образца:

а) для образца продолжительного действия. Массив информации, содержащий, наряду с другими данными, сведения о количестве отказов, произошедших за рассматриваемый промежуток испытаний зачетной выборки опытного ракетного двигателя, а также сведения о суммарной наработке экземпляров зачетной выборки на момент каждого отказа;

б) для образца кратковременного действия. Массив информации, содержащий, наряду с другими данными, сведения о количестве отказов, произошедших за рассматриваемый промежуток испытаний зачетной выборки экземпляров опытного ракетного двигателя, а также сведения о количестве испытываемых образцов;

– малый объем статистической информации о работоспособности образца: массив информации, соответствующий случаям отсутствия отказов при испытаниях, когда известны суммарная наработка испытываемых экземпляров ракетного двигателя зачетной выборки и количество опытов (для образцов однократного применения продолжительного действия) или количество испытывавшихся экземпляров двигателя (для образцов однократного применения кратковременного действия);

– большой объем статистической информации о работоспособности образца: массив информации, позволяющий построить законы распределения вероятности невозникновения отказа образца.

Результаты исследования

Экспериментальную отработку авиационных РД можно представить в виде многоэтапного процесса. На первом этапе испытываются элементы, на втором этапе – группы приборов и узлов, на третьем – функциональные группы изделий, на четвертом – составные части системы, на пятом система в целом.

Испытания авиационных РД показывают, что экспериментальная отработка систем такова, что не исключает повторения испытаний на каждом этапе, а также возвращения на предыдущие этапы испытаний. Например, при проведении предварительных или государственных испытаний изделия могут обнаружиться отказы, из-за которых требуется доработка элементов, составных частей и т.д. с последующим повторным проведением испытаний.

Всю совокупность отказов изделий, выявляемых при испытаниях, делят на две группы:

– отказы, проявляющиеся детерминированно в первом же испытании при имитации одного воздействующего фактора (предполагается, что после доработки изделия отказ по данному фактору больше не проявляется);

– отказы, проявляющиеся случайно с некоторой интенсивностью.

Общее число испытаний, требующееся для выявления и устранения отказов:

$$N_{\Sigma} = \sum_{m_i} (2n_{\phi i} + 1),$$

где m_i – число изделий, на которых проявляются отказы;

$n_{\phi i}$ – число факторов, проверяемых на i -м изделии.

Выражение предполагает проведение одного дополнительного испытания для подтверждения эффективности проведенных мероприятий по устранению причин отказов [3].

Необходимо учитывать возможность проведения утяжеленных испытаний по отдельным воздействующим факторам, кратность испытаний изделий, опыт отработки и выявления отказов на прототипах.

Законы проявления случайных факторов можно представить в виде:

$$\begin{aligned} P_{\text{элемент}}^i &= (\lambda_i^{k_i} / k_i!) \exp(-\lambda_i); \\ P_{\text{изд}}^j &= (\lambda_j^{k_j} / k_j!) \exp(-\lambda_j); \\ P_{\text{фг}}^f &= (\lambda_f^{k_f} / k_f!) \exp(-\lambda_f); \\ P_{\text{сч}}^g &= (\lambda_g^{k_g} / k_g!) \exp(-\lambda_g); \\ P_{\text{сист}}^h &= (\lambda_h^{k_h} / k_h!) \exp(-\lambda_h), \end{aligned}$$

где $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_f, \lambda_g, \lambda_h$ – параметры закона Пуассона для элементов, изделий, групп, составных частей и системы в целом;

$$k = 0, 1, 2, \dots, n.$$

При переходе на следующий этап испытаний (в более крупной структуре) необходимо зафиксировать число оставшихся невыявленных факторов для каждого элемента, а также количество проведенных испытаний по каждому фактору после последней доработки.

При переходе от автономных испытаний элементов к испытаниям изделия в целом добавляются дополнительные факторы – факторы связи, взаимодействия элементов, узлов в составе изделия, обладающие плотностью распределения вероятностей λ_k . Данные факторы проявляются в процессе испытаний изделия.

При решении задачи по нахождению варианта отработки системы, удовлетворяющей условию $P \geq P_c^{\text{TP}}$ с минимальными затратами ресурсов на систему, задают значения P_c^{TP} , которые необходимо подтвердить на этапе приемосдаточных испытаний.

$$P_{\text{сmin}}^{\text{TP}} \leq P_c^{\text{TP}} \leq P_{\text{сmax}}^{\text{TP}}$$

Учитывая структуру элементов, составных частей, изделия в целом, сведения о запасах работоспособности, кратности испытаний для выявления каждого фактора назначают интенсивности отказов по каждому фактору λ_i .

При экспериментальной отработке изделия в первую очередь проявляются отказы, обусловленные конструктивно-производственными недоработками.

Данные отказы записываются в виде закона:

$$P_c^i = (\lambda_i^k / K!) \exp(-\lambda_i),$$

где $X = 0, 1, \dots, n$;

$$K = 0, 1, \dots, n;$$

λ_i – интенсивность отказов.

Таким образом, в зависимости от уровня проектной надежности находим зависимость:

$$C = f(P_{\text{отраб}}),$$

где C – затраты ресурсов.

Добавляя к полученным затратам стоимость проектно-конструкторской разработки, стоимость отработки системы на детерминированные факторы (отказы), можно получить оптимальное решение, соответствующее минимуму суммарных затрат.

В процессе экспериментальной отработки обычно возникает задача выбора не одного, а группы мероприятий по обеспечению надежности изделия. Задача решается в два этапа:

- формирование комплекса мероприятий по обеспечению надежности изделия;
- выбор мероприятий, затраты на реализацию которых минимальны.

Для оценки экономического эффекта программы по обеспечению надежности (ПОН) изделия обычно используют зависимость:

$$C_i = f(\lambda_i).$$

Тогда целевую функцию выбора оптимального варианта ПОН можно записать в виде:

$$C = F(C_i).$$

Математическая постановка задачи оптимального формирования ПОН системы имеет вид:

$$C_{\min} = \min F(C_i) = F(C_i^*),$$

где C_i^* – затраты на обеспечение надежности каждого изделия, при которых общие затраты на обеспечение необходимого уровня надежности минимальны.

Одним из вариантов поиска оптимального варианта ПОН изделия является применение методов целочисленного математического программирования.

Для вновь создаваемых и эксплуатируемых изделий целесообразно проводить построение достаточно достоверных моделей, описывающих зависимости ПОН от интенсивности отказов изделий в различных условиях эксплуатации. Наличие такой информации позволяет на этапе проектирования выбрать наилучший вариант технических мероприятий по обеспечению надежности авиационных ракетных двигателей.

В процессе длительной эксплуатации РД объекты авиационного назначения подвергаются воздействию различных внешних факторов (климатических, механических, химических и т.д.), которые могут привести к изменению их технического состояния и первоначально определенных в нормативно-технической документации назначенных показателей (время работы, импульс тяги, срок службы, срок хранения и др.).

В настоящее время в эксплуатирующих организациях скопилось значительное количество изделий с истекшими сроками хранения. Проблема их продления является одной из наиболее актуальных.

Комплекс работ, проводимых при испытаниях и исследованиях РД по определению допустимых сроков эксплуатации, включает следующий объем работ:

- изучение конструктивных и эксплуатационных особенностей, их характеристик и параметров;
- изучение материалов отработки, испытаний и опыта эксплуатации прототипов и аналогов;
- проведение эксплуатации в естественных климатических условиях в течение потребных назначенных показателей;
- анализ характеристик и технического состояния;
- выявление критических звеньев в конструкции;
- выявление критических значений назначенных показателей ракетных двигателей для проведения оптимальной эксплуатации объектов;
- разработка и внедрение конструктивных и технологических мероприятий по их совершенствованию.

По результатам проведенных исследований предприятием-разработчиком совместно с профильным учреждением МО РФ выпускается бюллетень о продлении ресурсных показателей двигателя в зависимости от степеней готовности к применению.

В случае несоответствия основных характеристик и состояния материальной части требованиям нормативно-технической документации на изделиях проводятся соответствующие доработки с последующим проведением контрольных испытаний [4].

Рассмотрение и анализ данных по эксплуатации серийных авиационных РД на предприятиях-разработчиках и специализированных организациях МО РФ, обсуждение проблемы на технических совещаниях свидетельствуют о недостаточности проработки вопросов, связанных с обеспечением требуемого уровня надежности ракетных двигателей в течение срока службы, и отсутствие расчетного метода оценки и прогнозирования этих показателей в процессе длительной эксплуатации.

Вывод

Разработка, совершенствование теоретических и экспериментальных методов определения и выбора рациональных путей обеспечения необходимого уровня надежности изделий являются одной из важнейших актуальных и практически значимых задач создания и эксплуатации авиационных ракетных двигателей.

Библиография

1. ГОСТ 27.002 - 89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. ГОСТ 27.003 - 90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
3. ГОСТ 27.301 - 95 Надежность в технике. Расчет надежности.
4. ГОСТ В21258-86. РДТТ. Основные положения по обеспечению и контролю надежности.

Bibliography

1. GOST 27.002 - 89 Industrial product dependability. Basic concepts. Terms and definitions.
2. GOST 27.003 - 90 Industrial product dependability. The composition and the general rules of job requirements for reliability.
3. GOST 27.301 - 95 Industrial product dependability. Calculation of reliability.
4. GOST В21258-86. RESF. Basic provisions to ensure and control reliability.