

ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ НА НАДІЙНІСТЬ РАКЕТНОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ЛОГІКО-ЙМОВІРНІСНОГО МЕТОДУ

С. М. Подольчак

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр. Гагаріна 72, м. Дніпро, 49010, Україна*

Аннотация. Предложен логико-вероятностный метод оценки результата испытания, который основывается на теории доказательств Демпстера-Шафера с некоторыми допущениями, не влияющими на конечный результат. В настоящее время остро стоит вопрос о создании новых образцов ракетной техники в связи со сменой конъюнктуры на международном и внутреннем рынке. При создании новых образцов необходимо уделять особое внимание уровню их надежности, но и не забывать учитывать финансовую составляющую проектов по разработке и изготовлению изделий. В связи с этим, в данный момент проводятся исследования не только в направлении повышения надежности сложных технических систем, к которым относятся и ракетные двигатели, но и в направлении снижения стоимости их доводки. Один из вариантов исследований в данном направлении и был предложен автором в данной работе. Целью работы и исследования в целом была задача продемонстрировать возможности выбранного метода для оценки результатов испытаний, по которым можно было бы сделать выводы об успешности проведения самих испытаний. Как показали исследования, логико-вероятностный метод оценки результатов испытаний на основе теории доказательств Демпстера-Шафера из-за недостаточного объема априорной информации возможно применить при разработке новых образцов ракетных двигателей, но только в узком направлении. Более широко данный метод можно использовать при проектировании изделий на основании накопленного опыта (объема информации) по существующим уже аналогам. Теорию доказательств Демпстера-Шафера возможно применить и на более ранних этапах проектирования, но только в сочетании с другими моделями надежности.

Ключевые слова: НАДЕЖНОСТЬ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ, ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ, ТЕОРИЯ ДЕМПСТЕРА-ШАФЕРА, ФУНКЦИЯ ДОВЕРИЯ, ФУНКЦИЯ ПРАВДОПОДОБИЯ.

Анотація. В роботі розглянуто один із логіко-ймовірнісних методів оцінки результатів випробувань, який базується на теорії доказів Демпстера-Шафера, на основі якого можлива побудова модернізованого, за допомогою додаткових моделей, методу оцінки результатів випробувань ракетного двигуна. Даний метод дозволить прийняти або відкинути гіпотезу про успішність проведення випробувань.

Ключові слова: НАДІЙНІСТЬ РАКЕТНОГО ДВИГУНА, ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ, ТЕОРІЯ ДЕМПСТЕРА-ШАФЕРА, ФУНКЦІЯ ДОВІРИ, ФУНКЦІЯ ПРАВДОПОДІБНОСТІ.

Abstract. A logical-probabilistic method for evaluating the test result is proposed, which is based on the theory of evidence of Dempster-Schafer with some assumptions that do not affect the final result. Currently, there is an acute question of creating new types of rocket technology in connection with a change in the situation on the international and domestic market. When creating new samples, it is necessary to pay special attention to the level of their reliability, but also remember to take into account the financial component of projects for the development and manufacture of products. In this regard, research is currently being conducted not only in the direction of increasing the reliability of complex technical systems, which include rocket engines, but also in reducing the cost of their refinement. One of the research options in this direction was proposed by the author in this work. The aim of the work and research as a whole was to demonstrate the capabilities of the chosen method for evaluating the test results, according to which it would be possible to draw conclusions about the success of the tests themselves. As studies have shown, the logical-probabilistic method for evaluating test results based on the Dempster-Schafer theory of evidence, due to the lack of a priori information, can be used in the development of new rocket engine models, but only in a narrow direction. More widely, this method can be used in the design of products based on accumulated experience (amount of information) on existing analogues. Dempster-Schafer proof theory can be applied at earlier design stages, but only in combination with other reliability models

Keywords: RELIABILITY OF THE ROCKET ENGINE, RELIABILITY TESTS, DEMPSTER-SAFER THEORY, TRUST FUNCTION, LIKELESS FUNCTION

Вступ

На ранньому етапі проектування нових зразків ракетних двигунів виникають проблеми як при оцінці надійності нового виробу, так і з прогнозуванням результатів випробувань, які пов'язані з недостатнім об'ємом інформації для проведення необхідних розрахунків.

В даний час гостро стоїть питання про створення нових зразків ракетної техніки в зв'язку зі зміною кон'юнктури на міжнародному та внутрішньому ринку. При створенні нових зразків необхідно приділяти особливу увагу на рівні їх надійності, але і не слід забувати враховувати фінансову складову проектів з розробки та виготовлення виробів.

У зв'язку з цим, в даний момент проводяться дослідження не тільки в напрямку підвищення надійності складних технічних систем, до яких відносяться і ракетні двигуни, а й у напрямку зниження вартості їх доведення.

Висновки про доцільність доробки окремих вузлів та агрегатів РД можливо зробити якщо випробування класифікуються як «залікові». А про це можливо судити тільки за результатами самих випробувань. Такі результати можливо отримати тільки у разі залікових випробувань, тобто випробувань, за результатами яких можуть бути зроблені висновки про відповідність (або невідповідність) ракетного двигуна вимогам, відносно основних параметрів і стану матеріальної частини після випробування [1].

У свою чергу залікові випробування, згідно з ДСТУ 2860-94 можуть бути: успішними та неуспішними. Успішні випробування - випробування, при яких значення основних параметрів задовольняли вимогам технічної документації розроблювача двигуна, а матеріальна частина не мала несправностей, здатних привести до відмови виробу; неуспішні випробування - випробування, при яких значення основних параметрів не задовольняли вимогам розроблювача двигуна або

матеріальна частина мала несправності, які здатні привести до відмови виробу.

Випробування, за результатами яких не можуть бути зроблені висновки про відповідність (або невідповідність) ракетного двигуна вимогам відносно основних параметрів і стану матеріальної частини після випробування, або з аналізу результатів випробування впливає, що на його результат мали вплив особливості виготовлення двигуна, особливості підготовки і проведення випробування, характерні тільки для даного випробування, відносяться до «незалікових» випробувань.

При оцінці надійності двигуна використовують тільки результати залікових випробувань.

Постановка задачі

Метою дослідження, розглянутого в даній роботі, була можливість спрогнозувати успішний результат випробування на ранній стадії розробки ракетного двигуна за допомогою одного із логіко-ймовірнісних методів за недостатнього об'єму апріорної інформації.

Рішення завдання

Для вирішення поставленої задачі були зроблені деякі припущення, які б могли дещо полегшити вирішення поставленої задачі та суттєво не впливатимуть на загальний результат:

- на випробування поставлені вироби, виготовлені у відповідності до технічної документації;
- випробування проведені відповідно обраній програмі;
- відхилення у результатах обумовлені розроблювачем і замовником; на результати не вплинули особливості підготування і проведення випробування.

Такі припущення дозволяють нам зробити висновок, що результати випробувань будуть заліковими. Тобто, за цими результатами ми зможемо оцінити надійність ракетного двигуна. Але нам необхідно спрогнозувати, як саме завершилися випробування – успішно, чи

неуспішне. Щоб це зрозуміти побудуємо логіко-ймовірнісну модель надійності.

Для побудови логіко-ймовірнісної моделі використаємо теорію доказів Демпстера-Шафера, яка була використана у роботі [2]. Тоді, відповідно до теорії доказів Демпстера-Шафера висунемо дві гіпотези: гіпотезу H_0 , яка буде полягати у тому, що результати випробування можна оцінити як залікові успішні, та альтернативну їй – гіпотезу H_1 , яка буде полягати у тому, що результати випробування можна оцінити як залікові неуспішні.

Нехай, у ході випробування були отримані результати параметрів РД – X_i . Ці результати будуть складати множину A .

$$A = \{X_i | i = \overline{1, n}\} \quad (1)$$

Результати параметрів X_i , які будуть відповідати вимогам по надійності

$$P_n(X_i) \leq P(\alpha_i \leq X_i \leq \beta_i) \leq 1, \quad (2)$$

будуть складати множину B . Причому множина B буде підмножиною множини A , тобто $m \leq n$ і $B \subseteq A$.

$$B = \{X_j | j = \overline{1, m}\}, \quad (3)$$

де: X_j – значення параметрів за результатами випробувань, які задовольняють умові $(\alpha_i \leq X_i \leq \beta_i)$;

α_i та β_i – нижні та верхні межі значень параметра X_i .

Значення параметрів X_i , які не будуть відповідати вимогам по надійності (2), складуть ще одну множину – множину C , яка представляє собою різницю виразів (1) і (3) – $A \setminus B$, та має наступні властивості:

$$C \subseteq A;$$

$$C \cap B = \emptyset;$$

$$C \cup B = A.$$

Основу теорії Демпстера-Шафера складають три базові функції:

– частотна функція (базова ймовірність) m :

$$m(\emptyset) = 0, \quad \sum_{X_i \in A} m(X_i) = 1 \quad (4)$$

– функція довіри:

$$bel(B) = \sum_{B \subseteq A, X_i \in A} m(X_i) \quad (5)$$

– функція правдоподібності:

$$pls(B) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset, X_i \in A} m(X_i) \quad (6)$$

Функція довіри та функція правдоподібності пов'язані між собою залежністю

$$pls(B) = 1 - bel(\overline{B}) \quad (7)$$

У роботі [3] представлено, що функції довіри $bel(B)$ (5) та правдоподібності $pls(B)$ (6) розглядаються як нижня та верхня межі інтервалу, який містить точне значення ймовірності $P(B)$, підмножини B :

$$bel(B) \leq P(B) \leq pls(B).$$

Але, якщо функція довіри $bel(B)$ приймає значення від 0 до 1, і тут питань ніяких не виникає, то відповідно до залежності (7) функція правдоподібності $pls(B)$ може приймати значення 1 з якоюсь долею ймовірністю. А отже тут може виникнути неоднозначність, яка внесе труднощі у розрахунки. Подолати ці труднощі можна. Для цього до даної теорії Демпстера-Шафера необхідно буде ще додати якийсь метод. І найбільшої уваги заслуговує метод Байєсовських мереж [4].

В силу того, що Байєсовська мережа – це повна модель для змінних і їх відносин, вона може бути використана для того, щоб давати відповіді на ймовірні запитання. Наприклад, мережу можна використовувати, щоб отримати нове знання про стан підмножини змінних, спостерігаючи за іншими змінними (змінні-свідцтва). Це процес обчислення апостеріорного розподілу змінних по змінним-свідченням називають ймовірнісним висновком. Це наслідок дає нам універсальну оцінку для додатків, де потрібно вибрати значення підмножини змінних, яке мінімізує функцію втрат, наприклад, ймовірність помилкового рішення. Для більш повного уявлення про принцип побудови Байєсовської мережі краще було б використати модель «дерева відмов» [5]. Але так як у нас накладається всього дві умови, то можна його не будувати.

Для підтвердження гіпотези H_0 необхідно щоб за результатами випробування виконувалися наступні умови:

– кількість елементів (значень параметрів) множини B співпадала з кількістю

елементів (результатів випробувань) множини A , тобто $m = n$;

– виконувалися вимоги по надійності (2).

Позначимо виконання цих умов через U_1 та U_2 відповідно. Тоді, при прогнозуванні результатів випробування в умовах неоднозначності, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} P(U_1) &= \{0,1\} \\ P(U_2) &= \{0,1\} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де: 0 – умова не виконується; 1 – умова виконується.

Для більш повного уявлення про принцип побудови Байєсовської мережі краще було б використати модель «дерева відмов» [5]. Але так як у нас накладається всього дві умови, то можна його не будувати.

Проаналізувавши вираз (8) можна зробити висновок, що гіпотеза H_0 підтвердиться повністю тільки у випадку, коли будуть виконані обидві умови U_1 та U_2 , тобто:

$$\left. \begin{aligned} P(U_1) &= 1 \\ P(U_2) &= 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow P(H_0) = 1.$$

Висновки

Запропонована логіко-ймовірнісна модель на основі теорії доказів Демпстера-Шафера дозволила зробити висновок, що спрогнозувати результат випробування можливо тільки за певних умов.

Для більш точного прогнозу необхідно мати суттєвий об'єм інформації про результати випробувань виробів-аналогів.

На ранньому етапі створення нового виробу даний логіко-ймовірнісний метод, який базується на теорії доказів Демпстера-Шафера необхідно модернізувати за допомогою інших математичних моделей.

Бібліографічні посилання

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Будстандарт України, 1994. 103 с.
2. Li, Zhi Qiang, et al. Reliability analysis of an engine under uncertainty based on D-S evidence theory and Bayesian network." *Journal of Mathematical Models in Engineering [MME]*, 2017, vol. 3, no. 2, P. 78-88
3. Л. В. Уткин. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб.: Наука, 2007. 404 с.
4. Wójcicki T. Use of Bayesian networks and augmented reality to reliability testing of complex technical objects. *Journal of KONBiN*, 2015, Vol. 35, No. 1, P. 179 - 190.
5. Габрінець В., Подольчак С. Оцінка надійності ракетного двигуна як складної технічної системи за недостатньої статистичної інформації. *Авіаційно-космічна техніка і технологія. Науково-технічний журнал*. Харків. 2018. №4 (148). С. 36–43. ISSN 1727-7337.

Надійшла до редколегії 14.11.2019р

Відомості про авторів



Подольчак Сергій Михайлович,
Україна. Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара.
Старший викладач
Сфера інтересів – надійність ракетних двигунів.