

УДК 004.942:62-91

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗАПРАВКИ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Басотин Е.В., Витюк В.Л., Миронов Е.А., Мосиенко А.Г., Суворов А.Н.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: vka@mail.ru

В статье предложена математическая модель расчета надёжности системы контроля заправки ракеты-носителя в виде вероятностной функции недостижения предельного состояния. В качестве исходных данных для расчета предложено использовать вероятность безотказной работы конечных элементов дерева предельного состояния системы. Предложен порядок обследования и оценивания технического состояния системы, прогнозирования ресурса и обоснования рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить заданный уровень надёжности системы. В статье приведены основные определения и математические соотношения теории надёжности, позволяющие решить поставленную задачу без использования сложных математических и статистических алгоритмов. Результаты расчета надёжности системы контроля заправки могут быть использованы для дальнейшего расчета и прогнозирования вероятности безотказной работы системы на достаточно длительный период эксплуатации, что позволит прогнозировать эксплуатационные затраты на применение системы и свести к минимуму вероятность критичных отказов как системы, так и стартового комплекса в целом.

Ключевые слова: заправка, техническое состояние, ресурс, надёжность, ракета-носитель

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING RELIABILITY INDEX CONTROL SYSTEM FILLING SPACE ROCKETS

Basotin E.V., Vityuk V.L., Mironov E.A., Mosienko A.G., Suvorov A.N.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mail.ru

In the article the mathematical model for calculating the reliability of the control fueling of the launch vehicle system as a function of the probability of failure to reach a limiting condition. The initial data for the calculation proposed to use probability of failure of the finite element tree limit state system. A procedure of examination and evaluation of the technical state of the system, resource forecasting and rational justification of the list of activities to ensure the specified level of system reliability. The article presents the basic definitions and mathematical relations of reliability theory, allow to solve the problem without the use of complex mathematical and statistical algorithms. The results of calculation of grade refueling control system can be used for further calculation and prediction of the probability of failure-free operation of the system for a sufficiently long period of operation, that will predict the operating costs of the application of the system and to minimize the likelihood of critical failures as a system, and start system as a whole.

Keywords: refueling, maintenance, resource, reliability, space rocket

Система контроля заправки предназначена для выдачи контактных команд на пульт управления заправкой при достижении компонентами топлива во время заправки определенных значений в баках третьей ступени ракеты космического назначения среднего класса серии «Союз». Кроме того, система позволяет вести визуальный контроль заведением уровней компонентов топлива в баках в пределах ± 10 мм от точки «Уровень».

Система состоит из блока контроля заправки (БКЗ); пульта контроля указателей наполнения (ПК) с комплектом кабелей; пульта проверки (ПП) БКЗ и ПК с комплектом кабелей; имитатора (И) для проверки бортовой кабельной сети.

Целью исследования является разработка математической модели расчета надёжности системы контроля заправки, используемой для оценки готовности

третьей ступени ракеты космического назначения (РКН) среднего класса.

Исходные предположения и допущения метода исследования

Система контроля заправки РКН является сложной системой многократного циклического применения.

Система задействована на этапе заправки РКН, для которого заданы требования по надёжности функционирования СК – вероятность успешного функционирования (вероятность безотказной работы) СК на данном этапе должна быть не ниже 0,95.

Приемлемый уровень вероятности недостижения предельного состояния системой определяется исходя из его вклада в вероятность недостижения предельного состояния стартового комплекса в целом на каждом из этапов функционирования.

Разработка математической модели достижения предельного состояния системы

Дерево достижения предельного состояния представляет собой графическое отображение причинно-следственных связей между наступлением предельного состояния объекта с отказами (переходами в предельное состояние) его элементов и другими событиями [4]. При графическом построении деревьев отказов системы использовались обозначения логических операторов, представленные на рис. 1.

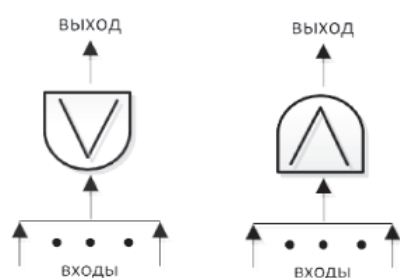


Рис. 1. Символы логических операторов «ИЛИ», «И» соответственно, используемые для графического построения дерева отказов системы

Остаточный ресурс (после наработки) – наработка объекта, начиная с момента до перехода в предельное состояние при установленных режимах применения и условиях эксплуатации [3].

Наработка – продолжительность или объем работы объекта [3]. Нарботка может измеряться в единицах времени или объема выполненной работы. Для оборудования системы, с учетом специфики их применения, наиболее удобно измерять наработку в единицах времени.

Предельное состояние (ПС) – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [3].

Критериями предельного состояния объекта являются установленные в стандартах и конструкторских документах признаки состояния объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация невозможна, нецелесообразна или опасна [6].

В основу формирования критериев предельного состояния оборудования системы целесообразно положить признаки, характеризующие невозможность восстановления работоспособного состояния.

Невозможность восстановления работоспособного состояния объекта опре-

деляется возникновением неустраняемых (в данных условиях) отказов, вызывающих прекращение функционирования объекта.

Под неустраняемостью отказа оборудования системы понимается невозможность устранения отказа без прерывания применения оборудования по назначению и проведения определенных действий, вызывающих длительные перерывы функционирования оборудования и необходимость вложения значительных материальных и финансовых средств (проведение среднего и капитального ремонта, модернизация средств, разработка и изготовление блоков аппаратуры на новой элементной базе, демонтаж и замена стационарных кабельных сетей и т.п.).

На основании описанного выше могут быть выделены следующие критерии предельного состояния системы:

1. Приемлемый уровень вероятности недостижения предельного состояния системой определяется исходя из его вклада в вероятность недостижения предельного состояния в целом на каждом из этапов функционирования.

2. Допустимое количество составных элементов системы, достигших предельного состояния, определяется на основе расчета вероятностной функции достижения предельного состояния.

Вероятности событий, являющиеся компонентами вероятностной функции достижения предельного состояния (ВФ ДПС), определяются исходя из физической природы процессов, приводящих к наступлению каждого из них. Численные значения вероятностей наступления каждого события рассчитываются на основе физических, физико-статистических или статистических моделей, в зависимости от возможности получения исходных данных и характера описываемых процессов. Исходными данными для расчетов на основе физических и физико-статистических моделей являются параметры технического состояния, полученные в ходе визуального и измерительного контроля, в том числе с использованием приборов неразрушающего контроля.

В качестве математической модели достижения предельного состояния системой следует рассматривать критерий [5]

$$G: P_{\text{ндпс}} \geq \gamma,$$

где $P_{\text{ндпс}}$ – вероятность недостижения предельного состояния системой; γ – условный приемлемый уровень вероятности недостижения предельного состояния (гамма), принятый для данной системы.

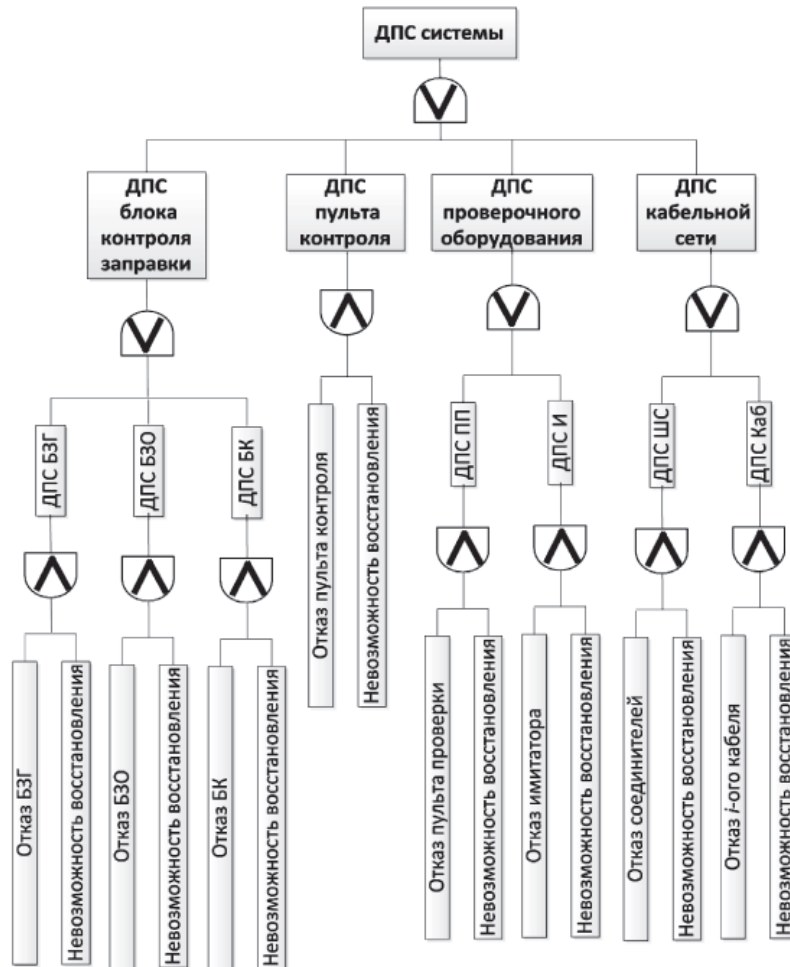


Рис. 2. Дерево достижения предельного состояния системы

Для более подробного представления математической модели достижения предельного состояния системой необходимо получить вероятностную функцию достижения предельного состояния, которая может быть получена путем формализации «дерева» достижения предельного состояния (рис. 2):

$$\text{ДПС} = X_{\text{БКЗ}} \vee X_{\text{ПК}} \vee X_{\text{ПРО}} \vee X_{\text{К}}, \quad (1)$$

где ДПС – достижение предельного состояния системы; $X_{\text{БКЗ}}$ – достижение предельного состояния блока контроля заправки; $X_{\text{ПК}}$ – достижение предельного состояния пульта контроля указателей наполнения; $X_{\text{ПРО}}$ – достижение предельного состояния проверочного оборудования; $X_{\text{К}}$ – достижение предельного состояния кабельной сети;

Логическая функция ДПС блока контроля заправки будет иметь вид:

$$X_{\text{БКЗ}} = Y_{\text{БЗГ}} \vee Y_{\text{БЗО}} \vee Y_{\text{БК}}, \quad (2)$$

где $Y_{\text{БЗГ}}$ – достижение предельного состояния блока заправки горючего; $Y_{\text{БЗО}}$ – достижение предельного состояния блока заправки окислителя; $Y_{\text{БК}}$ – достижение предельного состояния блока коммутации

В свою очередь:

$$Y_{\text{БЗГ}} = y_{\text{БЗГ}}^1 \wedge y_{\text{БЗГ}}^2; \quad (3)$$

$$Y_{\text{БЗО}} = y_{\text{БЗО}}^1 \wedge y_{\text{БЗО}}^2; \quad (4)$$

$$Y_{\text{БК}} = y_{\text{БК}}^1 \wedge y_{\text{БК}}^2, \quad (5)$$

где индексами y^1 обозначены переходы соответствующих элементов системы в неработоспособное состояние, индексами y^2 – невозможность восстановления работоспособного состояния.

Логическая функция ДПС пульта контроля указателей наполнения будет иметь вид

$$X_{\text{ПК}} = x_{\text{ПК}}^1 \wedge x_{\text{ПК}}^2, \quad (6)$$

где $x_{\text{ПК}}^1$ – переход пульта контроля указателей наполнения в неработоспособное со-

стояние; $x_{\text{ПК}}^2$ – невозможность восстановления работоспособного состояния.

Логическая функция ДПС проверочного оборудования будет иметь вид

$$X_{\text{про}} = Y_{\text{ПП}} \vee Y_{\text{И}}, \quad (7)$$

где $Y_{\text{ПП}}$ – переход пульта проверки БКЗ и ПК в неработоспособное состояние; $Y_{\text{И}}$ – переход имитатора для проверки бортовой кабельной сети в неработоспособное состояние.

В свою очередь:

$$Y_{\text{ПП}} = y_{\text{ПП}}^1 \wedge y_{\text{ПП}}^2; \quad (8)$$

$$Y_{\text{И}} = y_{\text{И}}^1 \wedge y_{\text{И}}^2, \quad (9)$$

где индексами y^1 обозначены переходы соответствующих элементов системы в неработоспособное состояние, индексами y^2 – невозможность восстановления работоспособного состояния.

Логическая функция ДПС кабельной сети будет иметь вид

$$X_{\text{К}} = Y_{\text{ШС}} \vee Y_{\text{К}}, \quad (10)$$

где $Y_{\text{ШС}}$ – переход штепсельных разъемов в неработоспособное состояние; $Y_{\text{К}}$ – переход кабелей в неработоспособное состояние;

В свою очередь:

$$Y_{\text{ШС}} = \bigvee_{i \in 1, n} (y_{\text{ШС}_i}^1 \wedge y_{\text{ШС}_i}^2); \quad (11)$$

$$Y_{\text{К}} = \bigvee_{i \in 1, n} (y_{\text{К}_i}^1 \wedge y_{\text{К}_i}^2), \quad (12)$$

где индексами y^1 обозначены переходы соответствующих элементов системы в неработоспособное состояние, индексами y^2 – невозможность восстановления работоспособного состояния.

После объединения выражений (1)–(12) получим

$$\begin{aligned} \text{ДПС} = & (y_{\text{БЗГ}}^1 \wedge y_{\text{БЗГ}}^2) \vee (y_{\text{БЗО}}^1 \wedge y_{\text{БЗО}}^2) \vee (y_{\text{БК}}^1 \wedge y_{\text{БК}}^2) \vee \\ & \vee (x_{\text{ПК}}^1 \wedge x_{\text{ПК}}^2) \vee (y_{\text{ПП}}^1 \wedge y_{\text{ПП}}^2) \vee (y_{\text{И}}^1 \wedge y_{\text{И}}^2) \vee \\ & \bigvee_{i \in 1, n} (y_{\text{ШС}_i}^1 \wedge y_{\text{ШС}_i}^2) \bigvee_{i \in 1, n} (y_{\text{К}_i}^1 \wedge y_{\text{К}_i}^2). \end{aligned}$$

Тогда НДПС = ¬ДПС будет определять логическую функцию недостижения предельного состояния системой [1]:

$$\text{НДПС} = \neg \left[(y_{\text{БЗГ}}^1 \wedge y_{\text{БЗГ}}^2) \vee (y_{\text{БЗО}}^1 \wedge y_{\text{БЗО}}^2) \vee (y_{\text{БК}}^1 \wedge y_{\text{БК}}^2) \vee \right. \\ \left. \vee (x_{\text{ПК}}^1 \wedge x_{\text{ПК}}^2) \vee (y_{\text{ПП}}^1 \wedge y_{\text{ПП}}^2) \vee (y_{\text{И}}^1 \wedge y_{\text{И}}^2) \vee \right. \\ \left. \bigvee_{i \in 1, n} (y_{\text{ШС}_i}^1 \wedge y_{\text{ШС}_i}^2) \bigvee_{i \in 1, n} (y_{\text{К}_i}^1 \wedge y_{\text{К}_i}^2) \right].$$

Соответствующая вероятностная функция недостижения предельного состояния системой будет являться произведением вероятностей событий, противоположных событиям, которые в свою очередь являются бинарными конъюнкциями [2].

Вероятностная функция недостижения предельного состояния имеет вид [1]

$$\begin{aligned} P_{\text{НДПС}} = & (1 - p_{\text{БЗГ}}^1 p_{\text{БЗГ}}^2) (1 - p_{\text{БЗО}}^1 p_{\text{БЗО}}^2) (1 - p_{\text{БК}}^1 p_{\text{БК}}^2) \vee \\ & \vee (1 - p_{\text{ПК}}^1 p_{\text{ПК}}^2) (1 - p_{\text{ПП}}^1 p_{\text{ПП}}^2) (1 - p_{\text{И}}^1 p_{\text{И}}^2) \vee \\ & \vee \left(\prod_{i=1}^n (1 - p_{\text{ШС}_i}^1 p_{\text{ШС}_i}^2) \right) \left(\prod_{i=1}^n (1 - p_{\text{К}_i}^1 p_{\text{К}_i}^2) \right), \end{aligned}$$

где $p_{\text{индекс}}^1$ – вероятность отказа узла, определенного индексом; $p_{\text{индекс}}^2$ – вероятность невозможности восстановления работоспособного состояния узла указанного индекса.

Результаты исследования и их обсуждение

При известных значениях вероятностей отказа конечных элементов дерева предельного состояния расчет вероятности безотказной работы системы не составляет труда. На основе статистических данных, полученных при эксплуатации системы, решается задача прогнозирования показателей надежности при выполнении работ по продлению назначенных показателей ресурса стартового комплекса, определяется перечень мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс системы не ниже требуемого согласно эксплуатационной и конструкторской документации.

По результатам определения рационального перечня мероприятий оформляется план мероприятий по обеспечению эксплуатации системы на продлеваемый период.

Выводы

Результаты расчета надёжности системы контроля заправки могут быть использованы для дальнейшего расчета и прогнозирования вероятности безотказной работы системы на достаточно длительный период эксплуатации, что позволит прогнозировать эксплуатационные затраты на применение системы и свести к минимуму вероятность критичных отказов как системы, так и стартового комплекса в целом.

Список литературы

1. Миронов А.Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – М: РФ. 2000. – 429 с.: ил.

2. Миронов Е.А., Платонов С.А. Решение задачи идентификации математической модели объекта прогнозирования в условиях неопределенности // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=14029>.

3. Надежность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний. Методические указания. РД 50–699–90. – Введ. 1992–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.

4. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002–89. – Введ. 1990–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.

5. Надежность машин / В.В. Клуюев [и др.], под общ. ред. В.В. Клуюева. – 2003. – 592 с.: ил. – ISBN 5-217-02884-X (Т. IV-3).

6. Положение по продлению назначенных показателей ресурса (срока службы) объектов наземной космической инфраструктуры. В 5 кн. Кн. 3. Прогнозирование остаточного ресурса (срока службы) объектов наземной космической инфраструктуры: ППР-2010: утв. Федеральным космическим агентством 29.12. 2010. – М.: ФКА, 2010. – 73 с.

References

1. Mironov A.N. Teoreticheskie osnovy i metody mnogo-modelnogo prognozirovaniya dolgovечnosti slozhnyh voenno-tehnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya. MO RF. 2000. 429 p.: il.

2. Mironov E.A., Platonov S.A. Reshenie zadachi identifikatsii matematicheskoy modeli obekta prognozirovaniya v usloviyah neopredelennosti // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 4; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=14029>.

3. Nadezhnost v tehnikе. Obshhie pravila klassifikatsii otkazov i predelnyh sostojaniy. Metodicheskie ukazaniya. RD 50–699–90. Vved. 1992–01–01. M.: Izd-vo standartov, 1991. 8 p.

4. Nadezhnost v tehnikе. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredeleniya. GOST 27.002–89. Vved. 1990–07–01. M.: Izd-vo standartov, 1990. 38 p.

5. Nadezhnost mashin / V.V. Kljuev [i dr.], pod obshh. red. V.V. Kljueva. 2003. 592 p.: il. ISBN 5-217-02884-H (T. IV-3).

6. Polozhenie po prodleniju naznachennykh pokazatelej resursa (sroka sluzhby) ob#ektov nazemnoj kosmicheskoy infrastruktury. V 5 kn. Kn. 3. Prognozirovanie ostatocnogo resursa (sroka sluzhby) ob#ektov nazemnoj kosmicheskoy infrastruktury: PPR-2010: utv. Federalnym kosmicheskim agentstvom 29.12. 2010. M.: FKA, 2010. 73 p.