

В.В. Типаев, М.А. Бунин, Т.В. Калинин, Н.С. Демидова, И.В. Осипова

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье описан подход к созданию технологии комплексного мониторинга технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры с учетом создания научно-методического аппарата оценивания остаточного ресурса технологического оборудования объектов инженерных систем объектов наземной космической инфраструктуры космодромов на основе разработанной математической модели, комплексно учитывающей объединенную статистическую ретроспективную информацию о текущем техническом состоянии объектов наземной космической инфраструктуры и информацию, полученную с использованием знаний и опыта экспертов. Модель построена на основе использования математического аппарата нечеткой логики. Описаны основные положения вышеуказанного подхода. Материал статьи может быть использован для более точной и объективной оценки фактической возможности применения объектов наземной космической инфраструктуры, а также для расширения информационной базы системы управления их эксплуатацией.

Ключевые слова: объект наземной космической инфраструктуры, остаточный ресурс, технология, мониторинг, техническое состояние, нечетко-статистическая оценка.

V.V. Tupaev, M.A. Bunin, T.V. Kalinin, N.S. Demidova, I.V. Osipova

FEATURES OF CREATION OF TECHNOLOGY FOR THE INTEGRATED MONITORING OF THE TECHNICAL STATE OF THE GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE FACILITIES

The article describes the approach of creation of technology for the integrated monitoring of the technical state of ground-based space infrastructure facilities taking into account the creation of a scientific and methodological apparatus for estimating the residual resource of support equipment of engineering systems objects of ground-based space infrastructure facilities of spaceports on the basis of the developed mathematical model that takes into account integrated statistical retrospective information on the current technical state of the ground-based space infrastructure facilities and information obtained using the knowledge and experience of experts. The model is based on the use of a mathematical apparatus of fuzzy logic. The main provisions of the above approach are described. The material of the article can be used to more accurately and objectively assess the actual possibility of using the ground-based space infrastructure facilities, as well as to expand the information base of the control system for their operation.

Keywords: ground-based space infrastructure facilities, residual resource, technical state, technology, monitoring, fuzzy-statistical estimation.

Развитие системы эксплуатации (СЭ) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) неразрывно связано с совершенствованием уже существующих и созданием новых изделий НКИ. СЭ объектов НКИ космодрома – целеустремленная организационно-техническая система, предназначенная для реализации, поддержания и восстановления их качества на стадии эксплуатации [1]. Успешное выполнение целевых задач космодрома во многом определяется степенью готовности составляющих СЭ ОНКИ космодромов и качества функционирования системы в целом.

Эффективность целевой эксплуатации космодрома зависит как от качества самих объектов эксплуатации (тактико-технические и эксплуатационно-технические характеристики), так и от эффективности процесса эксплуатации. При этом эффективность эксплуатации космодрома представляет собой совокупность таких интегральных свойств процесса эксплуатации, как безопасность, ресурсоемкость, надежность (в том числе оперативность, готовность) и т. д. Таким образом, создание максимально эффективной СЭ представляется задачей, не менее актуальной, чем строительство самого космодрома и составляющих его объектов.

Проблема использования оборудования, зданий и специальных сооружений космодромов, имеющих большие сроки эксплуатации за пределами гарантийных, может быть решена двумя взаимодополняющими путями [2]:

- 1) модернизацией или заменой на современные образцы;
- 2) обоснованным продлением сроков эксплуатации.

Первый путь является более предпочтительным, однако в современных экономических условиях далеко не всегда возможным. Тем более с учетом необходимости последовательного перевода принципиально важных задач космической деятельности на территорию России нецелесообразно осуществлять строительство новых объектов на космодrome Байконур, даже если это требует значительно меньших затрат. Строительство объектов на территории другого государства связано с постоянным риском их безвозвратной потери и возможностью использования против интересов Российской Федерации со стороны других государств.

В данных условиях наиболее целесообразным путем решения проблемы является обоснованное продление сроков эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры с использованием технологии комплексного мониторинга их технического состояния.

Примером формирования оценки остаточного ресурса узлов, агрегатов и систем объектов инженерных систем (ОИС) является нижеприведенная математическая модель прогнозирования их остаточного ресурса.

Результаты анализа эксплуатации достаточно большого числа сложных технических объектов [3] показывают, что при высокой степени износа их элементов и составных частей границы $\Delta_{\text{пд}}$ по техническим условиям могут не в полной мере соответствовать допущению об их неизменности. Оценки $\Delta_{\text{пд}}$ могут уточняться экспертными методами [4]. Это обстоятельство можно использовать для уточнения показателей остаточного ресурса ОИС и расширения возможностей управления состоянием комплекса ОИС ОНКИ, в особенности в условиях финансовых и временных ограничений, в полной мере присущих современному этапу развития космической отрасли России.

На основе обобщения эксплуатационных данных установлено, что сроки эксплуатации ряда ОИС значительно превышают установленные по техническим условиям на них. Проведены как плановые, так и внеплановые работы. Кроме этого, сделаны выводы о монотонности процессов изменения параметров их состояния и возможности экспертного оценивания границы поля допуска (ГПД) для ОИС, имеющих высокий расход ресурса.

Объединение накопленной ретроспективной информации о характере изменения качества ОИС и неформальной экспертной информации, отражающей компетент-

ность и знания специалистов, в последнее время исследуется математическими методами, использующими аппарат нечеткой логики для определения текущего технического состояния объектов.

Аналитическое описание модели прогнозирования остаточного ресурса ОИС

При решении задачи прогнозирования остаточного ресурса ОИС ОНКИ можно выделить два этапа: первый этап – разработка модели процесса изменения состояния ОИС; второй этап – идентификация разработанной модели по имеющимся данным [2; 5]. Установим, что показатели модели параметра $y(t)$ должны характеризовать тенденцию к постепенному ухудшению состояния ОИС и приближению его к пороговым значениям ГПД. При этом модель параметра $y(t)$ должна быть по возможности достаточно простой и позволять комплексное использование ретроспективных и текущих данных о параметре с экспертными заключениями о свойствах ОИС. Перечисленным требованиям удовлетворяет следующий подход к моделированию. Введем предположение о том, что одномерный закон распределения $y(t)$ на каждом из интервалов времени является нормальным с переменным математическим ожиданием и дисперсией. Результаты проведенного эксперимента позволили обосновать, что математическое ожидание параметра $y(t)$ может быть описано регрессивной моделью $y_{\text{пр}}(t)$ его тренда в следующей форме:

$$y_{\text{пр}}(t) = d_0 + d_1 t + \varepsilon, \quad (1)$$

где d_0, d_1 – коэффициенты уравнения регрессии;

ε – нормально распределенная величина погрешности прогнозирования.

Два первых слагаемых в модели (1) характеризуют неустранимое ухудшение ОИС. Предположим, что с некоторой периодичностью проведено n измерений параметра $y(t)$. Как правило, контроль состояния параметров ОИС ОНКИ предусматривается конструкторской и эксплуатационной документацией в рамках системы технического обслуживания и ремонтов и используется в расчетах стратегий управления состоянием этих объектов. В случае необходимости возможно проведение специально организованного мониторинга ОИС, хотя это и требует дополнительных затрат. Достижение предельного состояния ОИС количественно характеризуется вероятностью и временем пересечения параметром $y(t)$ его ГПД на заданном интервале времени. Оценки коэффициентов d_0, d_1 могут быть сравнительно просто получены по известным соотношениям [6; 10] на основе накопленной ретроспективной информации о состоянии ОИС за n предыдущих интервалов времени. Это является достоинством рассматриваемой модели.

Пусть показатели y_n и y_b ГПД представляют собой нечеткие числа y_n и y_b . В этом случае ГПД параметра $y(t)$ является также нечеткой величиной $\tilde{\Delta}_{\text{ГПД}}$, которая имеет следующее представление:

$$\tilde{\Delta}_{\text{ГПД}}(y(t)) = \{ \Delta_{\text{ГПД}}, \mu(\Delta_{\text{ГПД}}(y(t))) \}, \quad (2)$$

где $\mu(\Delta_{\text{ГПД}}(y(t)))$ – функция принадлежности $\tilde{\Delta}_{\text{ГПД}}$.

Методика прямого экспертного оценивания функции принадлежности нечетких множеств y_n и y_b ГПД $\Delta_{\text{ГПД}}$ параметра достаточно подробно рассмотрена в известной литературе по теории нечеткой математики [7]. Для соотношения (2) при оценке сложных технических систем целесообразно использовать по возможности наиболее простые факторные пространства (ФП), например LR-типа, колоколообразные и иные с небольшим числом параметров. При сделанных допущениях вероятность невыхода за нечеткие ГПД $\tilde{\Delta}_{\text{ГПД}}$ на интервале $[0, t]$ имеет следующий вид:

$$P(t) = \text{ВЕР} \{ y_n \leq y_{\text{пр}}(t) \leq y_b \} = \int_{y_n}^{y_b} w(x, t) dx, \quad (3)$$

где $w(x, t)$ – одномерная плотность распределения значения параметра $y(t)$ в момент времени прогноза t , которая при сделанных допущениях имеет следующий вид:

$$w(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[y_{\text{пр}}(t)]}} \exp\left(-\frac{(x - y_{\text{пр}}(t))^2}{2D[y_{\text{пр}}(t)]}\right). \quad (4)$$

Оценка дисперсии $D[y_{\text{пр}}]$ прогноза вычисляется с помощью соотношения

$$D[y_{\text{пр}}] = \left[\frac{n+1}{n} + \frac{3(n+2n_{\text{пр}}-1)^2}{n(n^2-1)} \right] \frac{\sum_{i=1}^n (y(t_i) - y_{\text{пр}}(t_i))^2}{n-2}, \quad (5)$$

где $n_{\text{пр}}$ – значение горизонта прогноза.

Нечетко-статистическая оценка $\tilde{t}^{(\text{OP})}$ остаточного ресурса ОИС до достижения предельного состояния при использовании предлагаемой модели индивидуально-го прогноза изменения технического состояния конкретного ОИС определяется из условия

$$\tilde{P}(t^{(\text{OP})}) = \tilde{P}^{(\text{TP})}, \quad (6)$$

где $\tilde{P}^{(\text{TP})}$ – граничное значение для нечеткой вероятности $\tilde{P}(t)$, устанавливаемое экспертным способом.

Граничное значение $\tilde{P}^{(\text{TP})}$ является своего рода аналогом вероятности, применяемой для оценивания процентного уровня расхода ресурса технического объекта [8]. Отличие состоит в его нечетком характере, что позволяет использовать опыт и знания экспертов применительно к конкретным условиям эксплуатации ОИС.

Предполагаемая комплексная технология мониторинга технического состояния объектов НКИ позволит оценить снижение работоспособности оборудования по совокупности определяющих его работу параметров без демонтажа узлов и деталей, т. е. в процессе штатной работы. Это обеспечит увеличение оперативности поиска дефектов и повышение коэффициента готовности объектов НКИ. Для вновь создаваемых и перспективных образцов ракетно-космической техники данная технология позволит интегрировать контрольно-измерительную аппаратуру комплекса мониторинга непосредственно в узлы, агрегаты и конструкцию технологического оборудования, зданий и специальных сооружений.

Целью разработки и внедрения предполагаемой технологии является разработка системы мониторинга технического состояния объектов НКИ на основе методов сбора и обработки информации о техническом состоянии, а также оценивание технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса объектов НКИ для продления срока их эксплуатации.

Задачи, которые необходимо решить в процессе разработки технологии:

- разработка и совершенствование научно-методического аппарата прогнозирования опасных отказов объектов НКИ, потенциально возможных в ходе их эксплуатации;

- разработка новых способов обследования приборами неразрушающего контроля параметров технического состояния критичных агрегатов и систем, зданий и сооружений объектов НКИ;

- разработка предложений по совершенствованию приборной базы неразрушающего контроля в направлении максимального учета специфики объектов НКИ в реальных условиях эксплуатации;

- разработка практических предложений по совершенствованию системы эксплуатации объектов НКИ с учетом использования технологии мониторинга технического состояния.

Выводы

Рассмотренный в настоящей статье подход к оцениванию остаточного ресурса ОИС ОНКИ является комплексным ввиду содержания в модели объединенной статистической ретроспективной информации о текущем техническом состоянии ОНКИ и информации, полученной с использованием знаний и опыта экспертов. Это позволяет более точно и полно учесть фактические возможности целевого применения ОИС, имеющих высокую техническую сложность, большие сроки эксплуатации и высокую степень неопределенности состояния.

Результатом внедрения предполагаемой технологии мониторинга технического состояния объектов НКИ является возможность контроля их технического состояния по совокупности определяющих его работу параметров (в процессе штатной работы).

С использованием данной технологии могут быть созданы следующие перспективные системы:

- система имитационного моделирования процессов функционирования объектов наземной космической инфраструктуры космодрома, разработанная на основе комплекса моделей процессов функционирования объектов НКИ и методик прогнозирования остаточного ресурса объектов, возникновения различных нештатных ситуаций и пр.;

- система информационной поддержки принятия решений по авторскому сопровождению эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры космодрома;

- система информационной поддержки принятия конструкторских решений по предупреждению, локализации и устранению последствий нештатных ситуаций при эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры космодрома;

- система оперативного информирования руководства Роскосмоса и Минобороны РФ о текущем состоянии объектов НКИ, принятых проектно-конструкторских решениях и ходе выполнения решений по управлению техническим состоянием объектов НКИ.

Разработка подобных систем приведет также к снижению себестоимости пусковых услуг при обеспечении достигнутого уровня надежности и безопасности эксплуатации объектов НКИ, в том числе за счет обоснованного сокращения присутствия на космодромах представителей разработчиков ракетно-космического комплекса (РКК), выполняющих функции авторского сопровождения эксплуатации объектов НКИ, а также представителей заказчика.

Литература

1. Основы эксплуатации космических средств / под ред. В.А. Никитина. – СПб. : ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2000. – 498 с.

2. Солдатенко Т.Н. Модель остаточного ресурса инженерных систем с высоким уровнем износа // Инженерно-строит. журн. – 2012. – № 6. – С. 64–74.

3. Алексеева А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем : учеб. для студентов высш. учеб. заведений. – М. : Изд. центр «Академия», 2009. – 352 с.

4. Миронов А.Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – М. : МО РФ, 2000. – 430 с.

5. Прикладные нечеткие системы / К. Асан, Д. Вагада, С. Иваи [и др.] / пер. с япон.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М. : Мир, 1993. – 368 с.

6. Солдатенко Т.Н. Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети в условиях неопределенности // Инженерно-строит. журн. – 2011. – № 5. – С. 60–66.

7. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей : учебник. – 10-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2006. – 575 с.

8. *Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П.* Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.

9. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Термины и определения.

10. *Абраменко Е.В., Гладышев А.И., Евенко А.В., Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е.* Метод построения и обоснование основных ТТХ бортового аппаратного комплекса космических аппаратов для решения задач получения, передачи и обработки измерительной информации в оптическом диапазоне длин волн // Оборон. комплекс – науч.-техн. прогрессу России. – 2017. – Вып. № 2 (134). – С. 26–31.

References

1. *Osnovy ekspluatatsii kosmicheskikh sredstv / pod red. V.A. Nikitina.* – SPb. : VIKU im. A.F. Mozhayskogo, 2000. – 498 s.

2. *Soldatenko, T.N.* Model' ostatochnogo resursa inzhenernykh sistem s vysokim urovnem iznosa // *Inzhenerno-stroit. zhurn.* – 2012. – № 6. – S. 64–74.

3. *Alekseeva, A.A., Korablev, Yu.A., Shestopalov, M.Yu.* Identifikatsiya i diagnostika system : ucheb. dlya studentov vyssh. ucheb. zavedeniy. – M. : Izd. tsentr “Akademiya”, 2009. – 352 s.

4. *Mironov, A.N.* Teoreticheskie osnovy i metody mnogomodel'nogo prognozirovaniya dolgovechnosti slozhnykh voenno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya. – M. : MO RF, 2000. – 430 s.

5. *Prikladnye nechetkie sistemy / K. Asan, D. Vatada, S. Iwai i dr. / per. s yapon.; pod red. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno.* – M. : Mir, 1993. – 368 s.

6. *Soldatenko, T.N.* Ekspertno-statisticheskii metod otsenivaniya parametrov upravlyayushchikh vozdeystviy na inzhenernye seti v usloviyakh neopredelennosti // *Inzhenerno-stroit. zhurn.* – 2011. – № 5. – S. 60–66.

7. *Ventsel', E.S.* Teoriya veroyatnostey : uchebnik. – 10-e izd., ster. – M. : Vyssh. shk., 2006. – 575 s.

8. *Borisov, A.N., Krumberg, O.A., Fedorov, I.P.* Prinyatie resheniy na osnove nechetkikh modeley. Primery ispol'zovaniya. – Riga : Zinatne, 1990. – 184 s.

9. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Термины и определения.

10. *Abramenko, E.V., Gladyshev, A.I., Evenko, A.V., Zhukov, A.O., Zakharov, A.I., Prokhorov, M.E.* Metod postroeniya i obosnovanie osnovnykh ttkh bortovogo apparaturnogo kompleksa kosmicheskikh apparatov dlya resheniya zadach polucheniya, peredachi i obrabotki izmeritel'noy informatsii v opticheskom diapazone dlin voln // *Oboron. kompleks – nauch.-tekhn. progressu Rossii.* – 2017. – Вып. № 2 (134). – С. 26–31.