

## Повышение эффективности системы неразрушающего контроля объектов наземной космической инфраструктуры при использовании ранжированных сетевых моделей и методов разрушающего контроля

© М.Ю. Ерофеев, Л.И. Попов

НИИ КС им. А.А. Максимова — филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область, 141091, Россия

*Рассмотрены возможные способы повышения эффективности системы неразрушающего контроля на основе оптимизации состава контролируемых элементов. Проанализированы недостатки современных методик сбора, хранения, систематизации и анализа информации об элементах наземной космической инфраструктуры (НКИ). Показаны возможности использования ранжированных по критичности и вероятности отказов сетевых моделей для выбора оптимальных вариантов стратегий ремонтных работ, применения электронных баз данных с возможностью масштабирования, а также применения методов разрушающего контроля для получения и накопления информации о рассеивании сроков службы и причинах потери работоспособности элементов НКИ.*

**Ключевые слова:** наземная космическая инфраструктура, неразрушающий и разрушающий контроль, сетевая модель.

**Ранжирование отказов.** Объекты наземной космической инфраструктуры (НКИ), как правило, содержат большое число элементов. В этих условиях обеспечить требуемые характеристики работоспособности системы улучшением качества одновременно всех элементов вряд ли возможно прежде всего по экономическим причинам. Однако очевидно, что отказы различных элементов в системе могут приводить к разным по степени влияния на состояние системы последствиям. В связи с этим естественным является стремление сосредоточить усилия на совершенствовании методов определения состава контролируемых элементов, важных для работоспособности системы.

Для выявления роли конкретных элементов (и их различных комбинаций) в обеспечении работоспособности всей системы применяются специальные показатели, среди которых — структурная важность элемента и критичность его отказов [1, 2]. Однако эти показатели не могут определяться только свойствами элемента и должны анализироваться в рамках сложной системы, содержащей данный элемент.

В соответствии с ГОСТ 27.310–95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» каждому элементу НКИ может быть присвоена определенная категория тяжести последствий отказов (табл. 1).

**Классификация отказов по тяжести последствий**

Категория тяжести последствий отказа	Характеристика тяжести последствий отказов
IV	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи
III	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей
II	Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей
I	Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей

В зависимости от вероятности появления возможно ранжирование отказов (табл. 2).

Таблица 2

**Матрица «Вероятность отказа — тяжесть последствий»**

Ожидаемая частота возникновения отказа	Тяжесть последствий			
	Катастрофический отказ (категория IV)	Критический отказ (категория III)	Некритический отказ (категория II)	Отказ с пренебрежимо малыми последствиями (категория I)
Частый	A	A	A	C
Вероятный	A	A	B	C
Возможный	A	B	B	D
Редкий	A	B	C	D
Практически невероятный	B	C	C	D

Присвоение каждому элементу НКИ ранга в соответствии с табл. 2 — сложная задача, которую приходится решать в условиях отсутствия полной информации об элементах. По мере накопления и систематизации такой информации появляется возможность ранжировать элементы с большей точностью. Важное значение имеет

правильная организация сбора, хранения, систематизации и анализа информации.

**Применение электронных баз данных и методов разрушающего контроля для повышения точности ранжирования.** Недостатки современных методик сбора, хранения, систематизации и анализа информации об элементах НКИ заключаются в следующем:

- фрагментарность решения задач технического диагностирования оборудования, отсутствие методов комплексного анализа результатов неразрушающего контроля, проводимого на объектах НКИ Роскосмоса и Министерства обороны РФ, позволяющих учесть и обобщить результаты выполненных ранее исследований, а также результаты исследований аналогов и прототипов диагностируемых элементов НКИ;

- отсутствие единого методического подхода к проведению контроля качества и надежности изделий как в рамках одного предприятия, так и на предприятиях космической отрасли в целом;

- отсутствие системного подхода к сбору, систематизации, хранению и обработке статистической информации о результатах проводимого технического диагностирования;

- высокая трудоемкость анализа результатов диагностирования, их зависимость от человеческого фактора, искажение первичной информации о техническом состоянии и надежности элементов НКИ вследствие ошибок при ручной обработке и анализе информации специалистами;

- низкая оперативность доступа контролирующих органов к информации о техническом состоянии и надежности элементов НКИ, а также обмена информационными документами и их обработки.

Эти недостатки снижают точность оценки и прогнозирования надежности и безопасности элементов НКИ и, как следствие, приводят к принятию некорректных решений по обеспечению качества и надежности изделий, повышению расхода материальных, финансовых и людских ресурсов при производстве и эксплуатации объектов НКИ.

Для повышения эффективности организации сбора, хранения, систематизации и анализа информации об элементах НКИ целесообразно использовать электронные базы данных, обладающие возможностью масштабирования (деталь — узел — агрегат — система — совокупность систем и агрегатов).

Источниками информации для электронных баз данных могут служить:

- нормативно-техническая документация (ГОСТ, РД, ПБ, ТУ, СНИП) на элементы НКИ;

- конструкторская документация;

- эксплуатационная документация (данные об отказах и наработке, приведенные в формулярах элементов НКИ);

- сообщения о неисправностях, рекламации;
- результаты технического диагностирования с использованием методов неразрушающего контроля;
- результаты разрушающего контроля элементов НКИ, выведенных из эксплуатации.

Элементы НКИ, выведенные из эксплуатации по истечении назначенного ресурса, как правило, утилизируют, несмотря на то что в них содержится ценная информация об их состоянии. Целесообразно применять разрушающий контроль выведенных из эксплуатации элементов НКИ для получения и накопления информации о рассеивании сроков службы и выяснения причин потери работоспособности.

Разрушающий контроль — это совокупность методов измерения и контроля показателей качества изделия, по завершении которого пригодность объекта контроля к использованию по назначению становится невозможной. Эти методы позволяют определить контролируемые параметры или характеристики (например, предел прочности или толщину покрытия) непосредственно на объекте.

Полученная с помощью разрушающего контроля информация может использоваться для уточнения технического ресурса и вероятности отказа элемента НКИ, а значит, точнее решать задачу ранжирования элементов НКИ аналогичного типа (см. табл. 2).

**Использование ранжированных сетевых моделей для выбора оптимального варианта стратегии исследования методами неразрушающего контроля.** Ремонт и техническое обслуживание — необходимые этапы эксплуатации элементов (систем и агрегатов) НКИ. Снижение работоспособности элемента НКИ в процессе эксплуатации — неотвратимый процесс, протекающий в зависимости от конструкции элемента и условий его использования с большей или меньшей интенсивностью.

Предельным состоянием элемента НКИ считается такое состояние, при котором вероятность выхода его параметров за допустимые пределы достигает установленного уровня. Начиная с этого момента требуется восстановление утраченной работоспособности элемента. Это обеспечивается ремонтом узлов и деталей, заменой износившихся частей запасными, регулировкой механизмов и др.

Необходимость периодического исследования с помощью методов неразрушающего контроля и восстановления работоспособности элементов НКИ обуславливает очень сложную задачу выбора эксплуатационниками периодов времени между ремонтами и техническим обслуживанием и установления их объемов.

Периодичностью исследования методами неразрушающего контроля и ремонта элемента НКИ  $T_0$  в основном определяется содержание ремонтных работ, так как в зависимости от срока службы детали

или узла эти работы будут включаться в соответствующий текущий ремонт. Однако решение о включении детали в тот или иной ремонт осложняется рассеиванием сроков службы, которое приводит к недоиспользованию потенциальной долговечности детали или к возрастанию вероятности отказа в межремонтный период.

Фактический срок службы  $T_{\phi}$  должен быть кратным межремонтному периоду  $T_0$ , т. е.  $T_{\phi} = kT_0$  ( $kT_0$  — назначенный ресурс детали узла или изделия), так как восстановление детали планируется при текущем ремонте. В зависимости от рассеивания сроков службы узла или детали при среднем сроке службы  $T_{cp}$  большем, чем период до  $n$ -го планового ремонта (т. е.  $T_{cp} > nT_0$ ), возможны следующие варианты назначения срока службы  $T_{\phi}$  (рис. 1) и соответственно стратегии ремонтных работ [3].

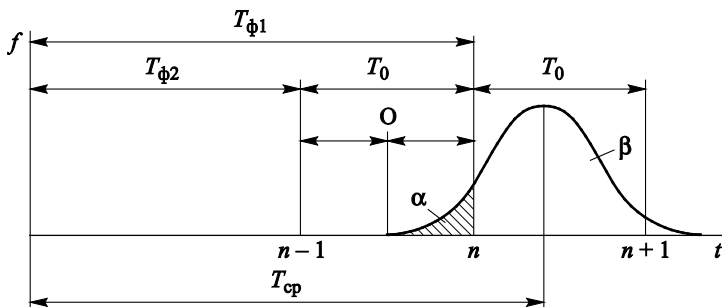


Рис. 1. Влияние рассеивания сроков службы деталей на содержание плановых ремонтов (исследования методами неразрушающего контроля)

*Вариант 1.* Исследование и ремонт детали (узла) осуществляется при  $n$ -м плановом ремонте, т. е. назначается срок  $T_{\phi 1} = nT_0$ . При этом имеется некоторая вероятность  $\alpha$  отказа детали до наступления  $n$ -го ремонта. Если отказ наступил до планового ремонта, то деталь ремонтируют или заменяют при межремонтном обслуживании. Такой вариант целесообразен, если вероятность отказа  $\alpha$  невелика, т. е. вероятность безотказной работы  $\beta = 1 - \alpha \geq P_{доп}(t)$ .

*Вариант 2.* Исследование и ремонт детали осуществляются при  $(n - 1)$ -м ремонте, т. е. срок  $T_{\phi 2} = (n - 1)T_0$ . В этом случае обеспечивается высокая безотказность изделия, однако сроки его службы значительно недоиспользуются, так как  $T_{\phi 2} \ll T_{cp}$ .

Для особо ответственных элементов НКИ вариант 2 может дополняться мониторингом их состояния на протяжении всего срока эксплуатации (вариант 2М).

*Вариант 3.* При  $(n - 1)$ -м ремонте производится контроль степени повреждения детали и дается заключение о возможности ее безотказной работы в течение последующего межремонтного периода. Диа-

гностику можно осуществлять во время специально запланированного осмотра  $O$ . В зависимости от результатов контроля ремонт детали осуществляется при  $(n - 1)$ -м или при  $n$ -м ремонте.

При таком варианте обеспечивается наибольший потенциальный срок службы детали при одновременной гарантии высокой безотказности работы изделия. Однако при этом требуются дополнительные затраты на диагностику, знание основных причин потери работоспособности и наличие методов и технических средств для обнаружения и оценки степени повреждения изделия.

Используя методы структурного и функционального анализа взаимосвязи элементов НКИ при эксплуатации, можно построить сетевую модель функционирования объекта НКИ (рис. 2), в которой каждому элементу соответствует определенный элемент НКИ (деталь, узел, агрегат, система).

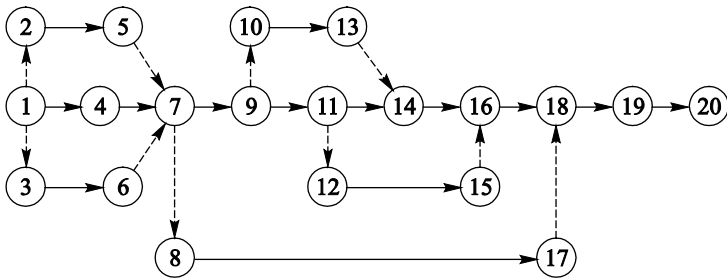


Рис. 2. Пример сетевой модели функционирования объекта НКИ

Присваивая каждому элементу сетевой модели ранг в соответствии с табл. 2, получаем ранжированную сетевую модель по критичности и вероятности отказов элементов (рис. 3). С помощью этой модели участки пути можно разделить по степени их критичности, что позволит выбрать оптимальные варианты стратегии исследования элементов или групп элементов НКИ методами неразрушающего контроля.

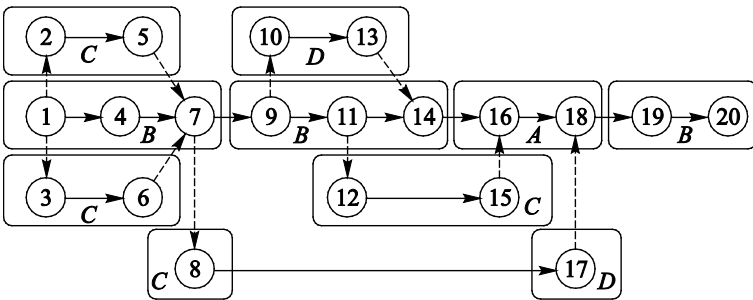


Рис. 3. Ранжированная сетевая модель по критичности и вероятности отказов элементов

Выбор оптимального варианта стратегии исследования методами неразрушающего контроля существенно влияет на показатели надежности и эффективности эксплуатации объектов НКИ. При обосновании состава контролируемых элементов предлагается учитывать их влияние на своевременность выполнения технологических операций.

**Заключение.** Использование ранжированных по критичности и вероятности отказов сетевых моделей для выбора оптимальных вариантов стратегий ремонтных работ, применение методов неразрушающего контроля при мониторинге состояния объектов НКИ, а также применение разрушающего контроля для получения и накопления информации о рассеивании сроков службы и причинах потери работоспособности элементов НКИ позволяют повысить эффективность системы неразрушающего контроля объектов наземной космической инфраструктуры.

*Авторы выражают благодарность Ю.М. Савельеву за помощь и поддержку.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефремов А.С., Зеленцов В.А., Миронов А.Н., Холоименко К.А. Критерии предельного состояния координатных АТС. *Вестник связи*, 2004, № 2, с. 71–76.
- [2] Афанасьев В.Г., Зеленцов В.А., Миронов А.Н. *Методы анализа надежности и критичности отказов сложных систем*. Санкт-Петербург, МО РФ, 1992, 99 с.
- [3] Проников А.С. *Параметрическая надежность машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 560 с.

Статья поступила в редакцию 06.06.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ерофеев М.Ю., Попов Л.И. Повышение эффективности системы неразрушающего контроля объектов наземной космической инфраструктуры при использовании ранжированных сетевых моделей и методов разрушающего контроля. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1519>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

**Ерофеев Михаил Юрьевич** — ведущий научный сотрудник, НИИ КС им. А.А. Максимова — филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». e-mail: trasimatza@mail.ru

**Попов Леонид Иванович** — заместитель директора по испытаниям и эксплуатации ракетно-космической техники, НИИ КС им. А.А. Максимова — филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». e-mail: niiks@khrunichev.com

# Increasing the effectiveness of the non-destructive testing system for ground-based space infrastructure using ranked network models and destructive testing methods

© М.Ю. Ерофеев, Л.И. Попов

Maximov Space Systems Research Institute, the branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolev town, Moscow region, 141091, Russia

*The article discusses possible ways of improving the efficiency of non-destructive testing systems based on optimization of the structure of tested elements. The shortcomings of modern methods of collecting, storing, managing and analyzing information about the ground-based space infrastructure elements are analyzed. The possibilities of using network models ranked by criticality and the probability of failure for selecting optimal variants of repair strategies, applying electronic databases with scaling feature, and using destructive testing to obtain and accumulate information about the life dispersion and identification the reasons for the loss of working capacity by elements of space infrastructure are shown.*

**Keywords:** ground-based space infrastructure, destructive and non-destructive control, network model.

## REFERENCES

- [1] Efremov A.S., Zelentsov V.A., Mironov A.N., Kholoimenko K.A. *Vestnik svyazi — Communication Bulletin*, 2004, no. 2, pp. 71–76.
- [2] Afanasyev V.G., Zelentsov V.A., Mironov A.N. *Metody analiza nadezhnosti i kritichnosti otkazov slozhnykh system* [Analysis methods for complex system reliability and failure criticality]. St. Petersburg, 1992, 99 p.
- [3] Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 560 p.

**Erofeev M.Yu.**, Leading Research Scientist, Maximov Space Systems Research Institute, the branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center.  
e-mail: trasimatza@mail.ru

**Popov L.I.**, Deputy Director on the testing and operation of space technology, Space Systems Research Institute, Maximov Space Systems Research Institute, the branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center.  
e-mail: niiks@khrunichev.com