

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аннотация. Рассмотрен алгоритм решения задачи оптимизации набора методов неразрушающего контроля, позволяющий обеспечить требуемый уровень достоверности оценивания технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры за пределами назначенных показателей ресурсов при минимизации затрат на дооснащение системы эксплуатации необходимым диагностическим оборудованием.

Ключевые слова: наземная космическая инфраструктура, параметры технического состояния, система эксплуатации, средства инструментального контроля.

Abstract. The article considers an algorithm to solve the problem of optimization of non-destroying control methods, allowing to provide a demanded level of reliability in evaluation of technical condition of ground space infrastructure facilities beyond the appointed parameters of resources, when minimization of equipping expenses for the operation system is conducted with the necessary diagnostic equipment.

Key words: ground space infrastructure, parameters of technical conditions, operation system, means of tool control.

Введение

В настоящий период из-за ограниченного финансирования значительно замедлился процесс модернизации объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) космических ракетных комплексов. В результате ряд объектов НКИ приходится длительное время эксплуатировать не только при продленных гарантийных сроках, но и за пределами назначенных показателей ресурса.

1. Трудности, возникающие при оценке остаточного ресурса

Основным подходом к организации эксплуатации объектов НКИ, находящихся за пределами назначенных показателей ресурса, является регулярный контроль за их фактическим техническим состоянием с последующим прогнозированием момента перехода объекта в предельное состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

При оценке запасов остаточного технического ресурса основные трудности связаны с отсутствием информации о реальном техническом состоянии, износе и фактических запасах ресурса объектов НКИ, а также с неопределенностью показателей предельных состояний объектов наземной космической инфраструктуры. Одним из путей преодоления этих трудностей явля-

ется включение в структуру системы эксплуатации дополнительных технических средств инструментального контроля (СИК) на базе методов неразрушающего контроля (методов дефектоскопии), обеспечивающих получение объективной информации для оценки технического состояния и предупреждения о приближении предельного состояния агрегатов и систем объектов НКИ.

Для того чтобы избежать недостатков одного метода и дополнить возможности одного метода возможностями другого, на практике в основном применяются комплексные системы средств инструментального контроля, использующие различные по физической природе методы неразрушающего контроля. Отсюда вытекает задача выбора таких методов неразрушающего контроля, совокупность которых позволит обеспечить требуемый уровень достоверности оценивания технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры, находящихся за пределами назначенных показателей ресурсов, при минимизации затрат на дооснащение системы эксплуатации необходимым диагностическим оборудованием.

2. Основные методы неразрушающего контроля

Анализ различных методов контроля исследуемых параметров [1–8] выявил тенденцию применения на практике комплексных систем средств инструментального контроля, использующих различные по физической природе методы контроля. Комплексирование позволяет избежать недостатков одного метода, взаимно дополнить возможности одного метода возможностями другого и реализовать тем самым принцип «избыточности» при контроле параметров технического состояния (ПТС) объектов наземной космической инфраструктуры, находящихся за пределами назначенных показателей ресурсов.

Применимость того или иного метода оценивается вероятностью достоверного измерения ПТС. При ее недостаточном уровне необходимо привлечение дополнительных СИК и комбинирование методов контроля, которое подразумевает не только использование нескольких методов, но и чередование их в определенной последовательности.

Вместе с тем включение в структуру системы эксплуатации комплексов средств инструментального контроля неизбежно приводит к существенному удорожанию как самих объектов НКИ, так и системы их эксплуатации. Поэтому при принятии решения о привлечении конкретных СИК следует решить задачу по определению их оптимального состава при минимизации стоимости дополнительных затрат.

Возможность применения того или иного метода неразрушающего контроля для оценки параметров технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры [1, 8] определяется тремя основными показателями:

- применимостью – принципиальной возможностью использования для измерения рассматриваемого параметра;
- чувствительностью – наименьшим размером выявляемого дефекта;
- выявляемостью – вероятностью обнаружения дефекта минимального размера.

На этапе эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, находящихся за пределами назначенных показателей ресурсов, примени-

мы не все методы неразрушающего контроля. Использование отдельных видов методов неразрушающего контроля (МНК) может быть ограничено их универсальностью, массово-габаритными характеристиками измерительных средств и сложностью применения.

С учетом массово-габаритных характеристик и сложности применения соответствующих средств контроля, а также универсальности на сегодня наиболее широкое распространение для контроля параметров технического состояния на этапе эксплуатации объектов НКИ, находящихся за пределами назначенных показателей ресурса, получили оптико-визуальный, ультразвуковой, рентгенографический, гаммаграфический, магнитопорошковый и капиллярный методы неразрушающего контроля. Кроме того, для контроля технического состояния элементов преобразования энергии и подвижных элементов достаточно широко применяются тепловизионный и вибрационный методы.

3. Формулировка задачи определения оптимального набора методов неразрушающего контроля

Задача оптимального комплектования комплекса средств инструментального контроля для диагностического контроля объектов наземной космической инфраструктуры, находящихся за пределами назначенных показателей ресурса, может быть сформулирована следующим образом.

Пусть существует N_i объектов контроля и множество $\{P_1, \dots, P_i, \dots, P_k\}$ методов неразрушающего контроля, при этом стоимость контроля объекта j -го типа i -м МНК составляет C_{ij} . Вероятность достоверного контроля j -го объекта i -м МНК – P_{ji} , а требуемая вероятность достоверного контроля всех контролируемых параметров – $P_{тр}$.

Требуется определить оптимальный набор МНК для получения требуемой информации о множестве объектов контроля, при котором суммарная стоимость контроля стремилась бы к минимуму при заданных ограничениях по достоверности контроля:

$$C_{\text{сум}} \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничении

$$P_k \geq P_k^{\text{тр}}. \quad (2)$$

Суммарные затраты на диагностику объектов НКИ определяются выражением

$$C_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} C_{ij} N_j, \quad (3)$$

где I_j – количество методов неразрушающего контроля, предназначенных для контроля объектов j -го типа и обеспечивающих достоверность контроля не ниже требуемой величины.

При этом достоверность контроля одного объекта при совместном применении нескольких методов неразрушающего контроля определяется выражением

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^{I_j} (1 - p_{ij}). \quad (4)$$

Вероятность достоверного контроля всех контролируемых объектов при условии независимости их контроля будет определяться как произведение вероятностей достоверного контроля каждого из контролируемых объектов:

$$P_k = \prod_{j=1}^J P_j = \prod_{j=1}^J \left[1 - \prod_{i=1}^{I_j} (1 - p_{ij}) \right]. \quad (5)$$

В окончательном виде задача оптимизации может быть записана в следующем виде:

$$C_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} C_{ij} N_j \rightarrow \min \quad (6)$$

при ограничении

$$P_k = \prod_{j=1}^J \left[1 - \prod_{i=1}^{I_j} (1 - p_{ij}) \right] \geq P_k^{\text{ТР}}. \quad (7)$$

4. Решение задачи определения оптимального набора методов неразрушающего контроля

Решение рассматриваемой задачи предполагает перебор различных вариантов наборов методов неразрушающего контроля, при этом в качестве показателя, который позволяет сравнивать варианты контроля параметров технического состояния различными МНК Q_{ij} , выбрано отношение уровня достоверности того или иного МНК p_{ij} к стоимости диагностического обследования объекта контроля с использованием этого МНК C_{ij} :

$$Q_{ij} = p_{ij} / C_{ij}. \quad (8)$$

В общем виде алгоритм решения задачи определения оптимального набора методов неразрушающего контроля представлен на рис. 1.

Если в результате решения задачи расчетная вероятность окажется больше требуемой, то последний в ранжированном списке вариант контроля исключается и повторяются шаги алгоритма, начиная со второго шага.

Если расчетная вероятность окажется меньше или равна требуемой, то текущие наборы методов неразрушающего контроля для контроля параметров принимаются решением рассматриваемой задачи и представляются в виде матрицы использования МНК:

$$H_{ij} = \|\xi_{ij}\|, \quad (9)$$

где $\xi_{ij} = 1$, если j -й МНК применяется для контроля i -го ПТС; $\xi_{ij} = 0$, если j -й МНК не применяется для контроля i -го ПТС.

Предположим, что в целях получения объективной информации для оценки технического состояния критичных элементов объектов НКИ, пред-

ставленных в левой части табл. 1, в структуру системы эксплуатации планируется включение представленного в правой части этой таблицы диагностического оборудования МНК с соответствующими характеристиками стоимости и достоверности методов. Требуемая вероятность достоверного контроля всех объектов принимается равной 0,95.

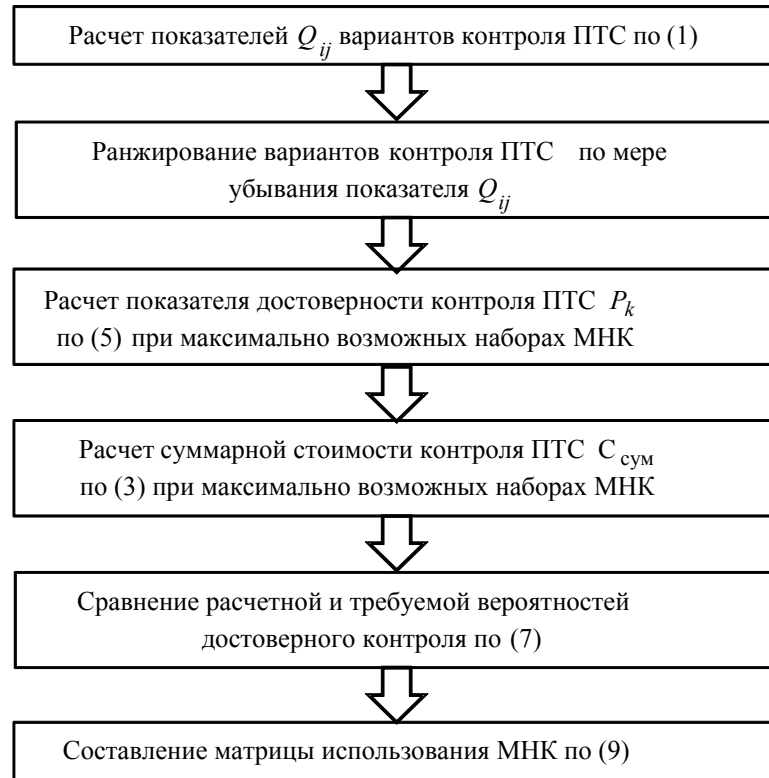


Рис. 1. Алгоритм решения задачи определения оптимального набора методов неразрушающего контроля

Таблица 1

Исходные данные по критичным элементам объектов НКИ и методам неразрушающего контроля

Данные по объектам контроля		Данные по методам неразрушающего контроля, стоимость у.е./достоверность					
Типовые неисправности	Количество	Визуально-инструментальный	Ультразвуковой контроль	Акустическая эмиссия	Вибрационный контроль	Теллоизионный контроль	Электроиспытания
1	2	3	4	5	6	7	8
Растрескивание и коррозия металла баллонов	400	$\frac{200}{0,8}$	$\frac{2000}{0,9}$	$\frac{2200}{0,92}$	–	–	–

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Негерметичность фланцевых соединений	10	$\frac{100}{0,8}$	$\frac{3450}{0,9}$	–	–	–	–
Износ элементов агрегатов	20	$\frac{100}{0,8}$	–	–	$\frac{400}{0,9}$	$\frac{100}{0,85}$	–
Разрушение подшипника электродвигателя	20	$\frac{100}{0,80}$	–	–	$\frac{400}{0,90}$	$\frac{100}{0,85}$	–
Биение вала электродвигателя	20	$\frac{100}{0,8}$	–	–	$\frac{400}{0,9}$	$\frac{100}{0,85}$	–
Короткое замыкание в элементах электрооборудования	10	$\frac{200}{0,8}$	–	–	–	$\frac{100}{0,85}$	$\frac{1000}{0,90}$

В соответствии с разработанным алгоритмом (см. рис. 1) проводится вычисление показателей ранжирования по (1) и достоверности контроля по (5), а также суммарной стоимости контроля по (3). Результаты проведенных вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты вычислений показателей ранжирования и достоверности контроля, а также суммарной стоимости контроля

Данные по объектам контроля (типичные неисправности объектов контроля)	Данные по методам неразрушающего контроля							
	Значения показателя ранжирования, $Q_{ij} \cdot 10^{-6}$				Показатели контроля			
	Визуально-инструментальный контроль	Ультразвуковой контроль	Акустическая эмиссия	Вибрационный контроль	Тепловизионный контроль	Электроиспытания	Показатель достоверности контроля	Суммарная стоимость контроля, млн у.е.
Растрескивание и коррозия металла баллонов	10,0	1,12	1,04	–	–	–	0,998	1,76
Негерметичность фланцевых соединений	800,0	260,8	–	–	–	–	0,98	0,035
Износ элементов агрегатов	400,0	–	–	112,5	425,0	–	0,997	0,012
Разрушение подшипника электродвигателя	400,0	–	–	112,5	425,0	–	0,997	0,012
Биение вала электродвигателя	400,0	–	–	112,5	425,0	–	0,997	0,012
Короткое замыкание в элементах электрооборудования	400,0	–	–	–	425,0	900,0	0,997	0,013
Вероятность достоверного контроля всех объектов контроля							0,97	
Суммарная стоимость контроля всех объектов контроля								1,844

Так как вероятность достоверного контроля всех объектов контроля $P_k = 0,97$ больше $P_{тр} = 0,95$, то из дальнейшего рассмотрения исключается метод акустической эмиссии, имеющий наименьший показатель ранжирования из всех МНК и вновь проводятся вычисления согласно алгоритму (см. рис. 1). Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты вычислений показателей ранжирования и достоверности контроля, а также суммарной стоимости контроля

Данные по объектам контроля (типичные неисправности объектов контроля)	Данные по методам неразрушающего контроля						Показатели контроля	
	Значения показателя ранжирования $Q_{ij} \cdot 10^{-6}$						Показатель достоверности контроля	Суммарная стоимость контроля, млн у.е.
	Визуально-инструментальный контроль	Ультразвуковой контроль	Акустическая эмиссия	Вибрационный контроль	Тепловизионный контроль	Электроиспытания		
Растрескивание и коррозия металла баллонов	10,0	1,12	–	–	–	–	0,98	0,88
Негерметичность фланцевых соединений	800,0	260,8	–	–	–	–	0,98	0,035
Износ элементов агрегатов	400,0	–	–	112,5	425,0	–	0,997	0,012
Разрушение подшипника электродвигателя	400,0	–	–	112,5	425,0	–	0,997	0,012
Биение вала электродвигателя	400,0	–	–	112,5	425,0	–	0,997	0,012
Короткое замыкание в элементах электрооборудования	400,0	–	–	–	425,0	900,0	0,997	0,013
Вероятность достоверного контроля всех объектов контроля							0,95	
Суммарная стоимость контроля всех объектов контроля								0,964

Решением задачи является матрица использования методов неразрушающего контроля (табл. 4).

Исключение из рассмотрения метода акустической эмиссии позволило достичь требуемого уровня достоверности контроля объектов наземной космической инфраструктуры $P_k = P_{тр} = 0,95$ и завершить процесс решения задачи оптимизации комплекса СИК на втором шаге с возможностью обеспечения снижения финансовых затрат на 47,7 %.

Матрица использования МНК

Типовые неисправности объектов контроля	Используемые методы неразрушающего контроля				
	Визуально-инструментальный контроль	Ультразвуковой контроль	Вибрационный контроль	Тепловизионный контроль	Электроиспытания
Растрескивание и коррозия металла баллонов	1	1	0	0	0
Негерметичность фланцевых соединений	1	1	0	0	0
Износ элементов агрегатов	1	0	1	1	0
Разрушение подшипника электродвигателя	1	0	1	1	0
Биение вала электродвигателя	1	0	1	1	0
Короткое замыкание в элементах электрооборудования	1	0	0	1	1

Заключение

Решение задачи оптимизации набора методов неразрушающего контроля с использованием предложенного алгоритма позволяет обеспечить требуемый уровень достоверности оценивания технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры за пределами назначенных показателей ресурсов при минимизации затрат на дооснащение системы эксплуатации необходимым диагностическим оборудованием.

Список литературы

1. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М., 1979.
2. ГОСТ РВ 15.702–94. СРПП ВТ. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы, срока хранения. – М., 1994.
3. ГОСТ Р 50599–93. Сосуды и аппараты стальные сварные высокого давления. Контроль неразрушающий при изготовлении и эксплуатации. – М., 1993.
4. ГОСТ 14782–96. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – М., 1996.
5. ГОСТ 20415–82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. – М., 1982.
6. ГОСТ 28702–90. Контроль неразрушающий. Толщинометрия ультразвуковая. Общие технические требования. – М., 1990.
7. ОСТ 36-75–83. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов, ультразвуковой метод. – М., 1983.

8. Методики оценивания эффективности функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, находящихся за пределами назначенных показателей ресурсов: НТО. – Юбилейный : НИИ КС, 2011. – 60 с.
-

Букрин Валерий Васильевич

доктор военных наук, профессор, заместитель директора по испытаниям и эксплуатации ракетно-космической техники, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева» (г. Юбилейный Московской обл.)

E-mail: niiks@aprt.ru

Петроковский Сергей Александрович

доктор технических наук, заместитель генерального конструктора Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Москва)

E-mail: niiks@aprt.ru

Чобанян Владимир Аршалуйсович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Юбилейный Московской обл.)

E-mail: niiks@khrunichev.com

Пустовалов Евгений Владимирович,

кандидат технических наук, доцент, начальник отдела, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Юбилейный Московской обл.)

E-mail: e-v-p1964@yandex.ru

Bukrin Valery Vasilyevich

Doctor of military sciences, professor, deputy director on space-rocket hardware testing and operation, Research Institute of Space Systems named after A. A. Maksimov – branch of “State Space Research and Production Center named after M. V. Khrunichev” (Yubileyny, Moscow region)

Petrokovsky Sergey Alexandrovich

Doctor of engineering sciences, deputy chief designer, State Space Research and Production Center named after M. V. Khrunichev (Moscow)

Chobanyan Vladimir Arshaluysovich

Doctor of engineering sciences, professor, Senior staff scientist, Research Institute of Space Systems named after A. A. Maksimov – branch of “State Space Research and Production Center named after M. V. Khrunichev” (Yubileyny, Moscow region)

Pustovalov Evgeny Vladimirovich

Candidate of engineering sciences, associate professor, department manager, Research Institute of Space Systems named after A. A. Maksimov – branch of “State Space Research and Production Center named after M.V. Khrunichev” (Yubileyny, Moscow region)

Торгашин Сергей Иванович

директор по производству, Научно-исследовательский институт физических измерений (г. Пенза)

E-mail: info@niifi.ru

Torgashin Sergey Ivanovich

Production manager, Research Institute of Physical Measurements (Penza)

УДК 621-192(035)

Алгоритм оптимизации комплекса средств инструментального контроля для диагностики объектов наземной космической инфраструктуры / В. В. Букрин, С. А. Петроковский, В. А. Чобанян, Е. В. Пустовалов, С. И. Торгашин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 72–81.