

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 621.3.019

DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-7

Н. И. Сидняев, К. А. Уракова

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ДОПУСТИМОМУ УРОВНЮ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

N. I. Sidnyaev, K. A. Urakova

METHOD FOR DETERMINING THE FREQUENCY OF DIAGNOSING SPACE SYSTEMS BY THE ACCEPTABLE LEVEL OF PROBABILITY OF UPTIME

Аннотация. Представлены методики прогнозирования надежности создаваемых устройств, проектирование устройств с заданной надежностью и сравнение надежности различных КС. С этой целью излагаются фундаментальные вопросы из теории надежности для проектирования КС, методы сбора и обработки данных о надежности аппаратуры по результатам эксплуатации и специальных испытаний на надежность. Разработаны методы, математические модели и проведен анализ структуры аппаратуры на этапе проектирования и при изготовлении. Приведены расчетные соотношения при различных видах резервирования в испытаниях, продления сроков эксплуатации блоков КА, основа которых – методология оценки остаточного ресурса. Систематизированы и изучены существующие методы анализа надежности. Изложены проблемы неопределенности информации по входным данным при расчетах классическими методами. Изучено влияние отклонения внешних воздействий от номинальных значений, непостоянность интенсив-

Abstract. The article presents methods for predicting the reliability of created devices, designing devices with a given reliability and comparing the reliability of various space systems. To this end, fundamental questions from the theory of reliability for the design of space systems, methods for collecting and processing data on the reliability of equipment based on the results of operation and special reliability tests are stated. Methods, mathematical models are developed and an analysis of the structure of the equipment at the design stage and in the manufacture. Design ratios are given for various types of redundancy in tests, extending the life of spacecraft blocks, the basis of which is the methodology for estimating the residual life. The existing methods of reliability analysis are systematized and studied. The problems of uncertainty of information on input data in the calculations by classical methods are described. The influence of the deviation of external influences from the nominal values, the inconsistency of the failure rate, the nonlinear nature of the influence of external factors on reliability are studied. The

ности отказов, нелинейный характер влияния внешних факторов на надежность. Исследован характер влияния внешних факторов на надежность и степень учета факторов в существующих методах. Отмечено, что качественные, организационно-технические (конструктивные и программные) требования по надежности, задаваемые в ТЗ для каждой стадии создания элементов КС в целом, должны выполняться и подтверждаться на соответствующей стадии работ. Представлены методики оценки ресурса технических объектов, среди которых важное место занимают методики, основанные на физических предпосылках расходования ресурса. Отмечена важность экономического аспекта исследования проблемы продления сроков эксплуатации КС. Постулируется, что принцип сравнимости результатов количественных оценок ТС предполагает использование единого состава исходных данных за определенный отчетный период времени, единство используемых обобщенных и частных показателей, а также единство принятых допущений и ограничений. Подчеркнуто, что все отказы и неисправности, выявленные на комплексе, независимо от того, повлияли ли они на результаты испытаний или нет, должны быть учтены, на них должны быть составлены информационные документы (сообщения о неисправности или рекламационные акты, акты исследования, подтвержденные протоколами исследования). Системный подход к анализу и оценке ТС предполагает комплексное рассмотрение на каждом этапе результатов анализа обобщенных и частных показателей технического состояния как единой системы взаимосвязанных величин и принятие решения на основе обобщенных показателей с использованием значимости частных показателей. Рассмотрены сущности методов определения периодичности технического состояния, указаны условия применения, а также достоинства и недостатки каждого метода. Показано применение общей и поэлементной постановки оценки состояния сложных механизмов с использованием диагностической матрицы и теории распознавания с целью определения состояния технических объектов. Описаны этапы общего процесса диагностирования объектов, состоящие из определения изменения параметров при воздействии на элементы объекта и дальнейшей обработки полученных результатов с применением методов синтеза и анализа.

Ключевые слова: надежность, методики, ресурс, проектирование, космический аппарат, оценка ресурса.

nature of the influence of external factors on the reliability and degree of consideration of factors in existing methods is investigated. It is noted that the qualitative, organizational and technical (structural and software) reliability requirements specified in the technical specifications for each stage of the creation of elements of space systems as a whole should be fulfilled and confirmed at the corresponding stage of work. Methods of assessing the resource of technical objects are presented, among which an important place is occupied by methods based on the physical premises of resource consumption. The importance of the economic aspect of the study of the problem of extending the life of space systems is noted. It is postulated that the principle of comparability of the results of quantitative assessments of technical systems involves the use of a single composition of the source data for a certain reporting period of time, the unity of the generalized and particular indicators used, as well as the unity of the assumptions and limitations adopted. It was emphasized that all failures and malfunctions detected at the complex, regardless of whether they affected the test results or not, should be taken into account, information documents should be drawn up on them (reports of malfunctions or complaints, research reports confirmed by research protocols) A systematic approach to the analysis and evaluation of technical systems involves a comprehensive review at each stage of the analysis of generalized and particular indicators of the technical condition as a single system of interrelated variables and decision-making based on generalized indicators using the significance of particular indicators. The essence of the methods for determining the periodicity of the technical condition is considered, the conditions of application, as well as the advantages and disadvantages of each method are indicated. The application of the general and element-wise statement of the state assessment of complex mechanisms using the diagnostic matrix and recognition theory in order to determine the state of technical objects is shown. The stages of the general process of diagnosing objects are described, consisting of determining changes in the parameters when exposed to the elements of the object and further processing the results using synthesis and analysis methods.

Keywords: reliability, techniques, resource, design, spacecraft, resource assessment.

Введение

Оценка технического состояния космических комплексов (КК) является важной задачей для предприятия-разработчика (изготовителя) при проведении анализа и оценки технического состояния КК и его составных частей разработки и выпуска отчетов о техническом состоянии КК на этапах производства и эксплуатации.

Существующие методики устанавливают основные принципы и методы анализа, единую систему показателей технического состояния КК, а также порядок проведения анализа и оценки тех-

нического состояния, формирование выводов и рекомендаций с целью повышения существующих показателей технического состояния КК и их составных частей. Совокупность стационарных и подвижных технических средств и сооружений, предназначенных для хранения, сборки, проверки, заправки, технического обслуживания ракеты космического назначения и (или) ее составных частей (ракеты-носителя, разгонного блока, космического аппарата) и подготовки ракеты космического назначения, к транспортированию на стартовый комплекс требуют систематической проверки. Совокупность стационарных и подвижных технических средств и сооружений с техническими системами, предназначенными для обеспечения готовности, подготовки и пуска ракет космического назначения нуждаются в методологическом обеспечении. В изделие КА входят: система, аппаратура, агрегат, прибор, блок, узел, изделие электронной компонентной базы, комплектующий элемент, программное изделие, входящие в состав КА или любой его структуры. Совокупность свойств, характеризующих его способность обеспечивать в процессе функционирования получение заданного в ТТЗ (ТЗ) выходного эффекта при заданных условиях и режимах эксплуатации. Отказ КА трактуется как событие, состоящее в том, что при функционировании КА не достигается заданный уровень выходного эффекта. Важную роль играет экспериментальная отработка, которая подразумевает совокупность работ, определенных комплексной программой экспериментальной отработки и выполняемых при испытаниях на моделях, макетах, опытных образцах с целью проверки соответствия характеристик изделий требованиям ТТЗ (ТЗ), обеспечения функционирования изделий, определения запасов их работоспособности в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации. Важно техническое состояние (КА), которое трактуется как совокупность подверженных изменению количественных и (или) качественных параметров, характеризующих способность комплекса (изделия) выполнять при определенных условиях в заданный момент или период времени присущие ему функции на установленном в НД уровне с учетом срока активного существования, а именно календарный отрезок времени с момента выведения (или принятия в эксплуатацию в составе орбитальной системы КА) до момента прекращения использования КА по целевому назначению из-за достижения предельного состояния (необратимого снижения выходного эффекта КА ниже допустимого уровня). Срок активного существования КА, при котором предельное состояние достигается из-за наступления деградационных отказов или исчерпания расходуемых компонентов бортовых систем КА, при отсутствии конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов. Математическая модель, воспроизводящая реальные свойства, связи и взаимодействие изделий КА и внешние условия в процессе функционирования КС (КК, изделия) и позволяющая исследовать различные свойства КС (КК, изделия). В соответствии с требованиями Положения РК-11-КТ организации, участвующие в создании, серийном (единичном) производстве и эксплуатации комплексов и их изделий, должны проводить работы по сбору, обработке, анализу, обобщению, представлению (обмену) информации о результатах отработки, о техническом состоянии и надежности комплексов и их изделий в соответствии с требованиями ГОСТ РО 1410-002-2010. Основными целями проведения анализа технического состояния КК и его составных частей являются оценка и установление тенденций изменений за определенный промежуток времени ТС КК и его составных частей, своевременная разработка рекомендаций и профилактических мероприятий, направленных на обеспечение требуемого уровня ТС и надежности (при отработке СЧ КК), поддержание или повышение этого уровня (при серийном производстве), а также контроль реализации выработанных мероприятий [1].

При анализе и оценке технического состояния КК следует придерживаться следующих основных принципов сравнимости результатов количественной оценки технического состояния КК и его изделий; полнота и достоверность информации об отказах и неисправностях, выявленных в течение отчетного периода; системного подхода к использованию показателей ТС КК и входящих в его состав составных частей (СЧ) и основных изделий, а также выбор последовательности этапов проведения анализа и оценка технического состояния.

Принцип сравнимости результатов количественных оценок ТС предполагает использование единого состава исходных данных за определенный отчетный период времени, единство используемых обобщенных и частных показателей, а также единство принятых допущений и ограничений. Вследствие этого показатели технического состояния могут быть распространены не только на различные модификации, виды, типы изделий (составных частей) КА, но и, собственно, на различные комплексы, рассчитаны за соответствующие отчетные промежутки времени и должны быть сравнимы между собой. Принцип полноты и достоверности информации об отказах и неисправностях, выявленных в течение отчетного периода времени, предполагает, что исходные данные, используемые

для проведения анализа и оценок ТС полно и достоверно характеризуют имевшие место события и обеспечивают получение объективных оценок технического состояния КК. Все отказы и неисправности, выявленные на комплексе, независимо от того, повлияли ли они на результаты испытаний или нет, должны быть учтены, на них должны быть составлены информационные документы (сообщения о неисправности или рекламационные акты, акты исследования, подтвержденные протоколами исследования). В исходные данные включают все отказы и неисправности, выявленные на готовых изделиях в течение отчетного периода времени (по дате выявления неисправности или отказа).

Параметры технического состояния космических комплексов и их изделий

Системный подход к анализу и оценке функционально связанных изделий КС предполагает комплексное рассмотрение на каждом этапе результатов анализа обобщенных и частных показателей технического состояния как единой системы взаимосвязанных величин и принятие решения на основе обобщенных показателей с использованием значимости частных показателей. Вероятность нахождения СЧ КК в исправном состоянии $P_{\text{итс}}(t)$ при проведении контроля (априорная вероятность) в моменты времени t . Вероятность нахождения СЧ КК в работоспособном состоянии $P_{\text{ортс}}(t)$ при проведении контроля в моменты времени t^* . Перечисленные показатели характеризуют надежность СЧ КК, эффективность мероприятий наземной экспериментальной отработки (НЭО), заводских контрольных испытаний, включая ПСИ изделий (составных частей) КК, допущенных к эксплуатации (летным испытаниям). Данные показатели носят априорный характер, т.е. позволяют утверждать в вероятностном смысле, в каком состоянии (исправном, работоспособном) находится изделие до проведения контроля, которое обеспечивается действующей системой качества и надежности на предприятии и в эксплуатирующей организации.

Оценка этих показателей осуществляется с использованием структурной схемы надежности (ССН). Вероятность нахождения СЧ КК в исправном состоянии $P_{\text{итс}}(t)$ после проведения контроля (апостериорная вероятность) в моменты времени t^* контроля с положительными результатами и допущенных к эксплуатации (применению). Вероятность нахождения СЧ КК в работоспособном состоянии $P_{\text{ортс}}(t)$ после проведения контроля в моменты времени t^* с положительными результатами и допущенного к эксплуатации (применению).

Эти показатели носят апостериорный характер, т.е. позволяют утверждать, в каком состоянии (исправном, работоспособном) в вероятностном смысле находится изделие после контроля, завершившегося с положительными результатами и допущенного к эксплуатации. В зависимости от задач анализа данные показатели могут рассматриваться и как показатели достоверности (эффективности) контроля СЧ КК и как показатели надежности КК. В частности, представляют частный случай нестационарного коэффициента готовности изделия, а именно, вероятность того, что не в какой-либо произвольный как в классическом случае, а именно, в конкретный момент времени t^* проведения контроля (либо после его проведения) изделие будет находиться в исправном (работоспособном) состоянии. Учитывая, что контроль (проверки, испытания) СЧ КК на ТК и СК, как правило, предшествует принятию решений о проведении запусков КА, наличие оценок указанных показателей для данного момента проведения контроля t позволяет принять либо снять распространенное на практике при оценке надежности допущение об исправности СЧ КК в начальный момент применения (пуска) КА. С другой стороны, используя терминологию и понятия надежности комплексов, принятые в ГОСТ РО 1410-001-2009 и определяемые через выходной эффект, показатели $P_{\text{итс}}(t)$ и $P_{\text{ортс}}(t)$ можно рассматривать как показатели надежности СЧ КК в целом, так как обеспечение к моменту запуска КА их исправности – это цель функционирования КК на этапе подготовки СЧ КК на ТК и СК. Указанные показатели выступают в качестве меры получаемого на этапе подготовки на ТК и СК выходного эффекта КК. Относительное количество отказов и неисправностей СЧ КК q_3 , выявленных при подготовке СЧ КК к пуску, в процессе подготовки и в полете на один КА (РН, РБ), характеризует качество создания, производства СЧ КК. Относительное количество отказов, выявленных в полете $q_{\text{отк}}$, характеризует эффективность контроля технического состояния СЧ КК на ТК и СК. Относительное количество неисправностей, выявленных при производ-

стве $q_{\text{пр}}$, характеризует систему контроля качества производства (применение нормативных документов, отраслевых стандартов, применяемые технологии, система контроля качества). Относительное количество конструктивных неисправностей $K_{\text{к}}$ характеризует полноту отработки и качество конструкторской и эксплуатационной документации. Относительное количество производственных неисправностей $K_{\text{пр}}$ характеризует качество изготовления и контроля, качество технологической документации. Относительное количество эксплуатационных неисправностей $K_{\text{э}}$ характеризует качество обученности персонала, эксплуатирующего технику, качество системы эксплуатации. Коэффициент эффективности $\eta_{\text{пр}}$ контроля – качество изготовления изделий СЧ КК. Относительное количество отказов и неисправностей, причина которых не установлена, $K_{\text{пну}}$ характеризует глубину исследования причин неисправностей и отказов. Относительное количество «закрытых» неисправностей $q_{\text{з}}$ (или коэффициент закрытия неисправностей, та же величина, выраженная в процентах) характеризует оперативность и полноту исследований и устранения причин неисправностей. Относительное количество повторяющихся неисправностей $K_{\text{повт}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности КК. Относительное количество повторяющихся неисправностей по конструктивной причине $K_{\text{повтК}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности за счет снижения количества конструкционных отказов изделий СЧ КК. Относительное количество повторяющихся неисправностей по производственной причине $K_{\text{повтПр}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности за счет снижения количества производственных отказов изделий СЧ КА. Относительное количество повторяющихся неисправностей по эксплуатационной причине $K_{\text{повтЭк}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности за счет снижения количества эксплуатационных отказов изделий СЧ КА [2].

Расчетные соотношения для определения обобщенных показателей ТС КК

Оценка обобщенных показателей осуществляется с использованием ССН. Каждая из систем СЧ КК может быть представлена в виде функционально и структурно объединенных приборов (агрегатов), имеющих резерв. Каждую систему в ССН будем рассматривать как блок, а входящие в бортовую систему приборы, агрегаты с резервными комплектами – как элементы ССН. Приборы и агрегаты некоторых бортовых систем могут и не иметь резерва. В этом случае такая система в ССН будет рассматриваться как блок и как элемент одновременно. Таким образом, ССН СЧ КК будет представлять собой схему, состоящую из M блоков j -х типов и N элементов i -х типов. Точечная оценка вероятности нахождения СЧ КК в исправном состоянии при проведении контроля в моменты времени t^* определяется по статистическим данным по формуле [3]

$$\hat{P}_{\text{итс}}(t) = \prod_{i=1}^N \hat{P}_{\text{итс}_i}(t),$$

где $\hat{P}_{\text{итс}}(t)$ – точечная оценка вероятности исправного состояния (ВИС) СЧ КК; $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ – точечная оценка ВИС i -го элемента ССН СЧ КК; N – общее число резервированных и нерезервированных элементов структурной схемы надежности СЧ КК; t^* – моменты времени, в которые проводится контроль ТС (при проведении ПСИ на ЗИ, при проведении технического обслуживания, при подготовке к пуску КА (РН, РБ) на ТК и на СК). В свою очередь, оценки $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ на этапах ЛИ и эксплуатации определяются по имеющимся статистическим данным, используя выражение: $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t) = 1 - m_i / n_i$, где m_i – суммарное число неисправных элементов i -го типа, выявленных и устраненных при инструментальном контроле (проверках) ТС в соответствующие моменты времени t^* (при проведении ПСИ на ЗИ, при проведении технического обслуживания, при подготовке КА (РН, РБ) на ТК(СК) к пуску); n_i – суммарное количество проверок, проведенных в соответствующие моменты времени t , за отчетный период [4].

Вероятность нахождения КА (РН, РБ) в работоспособном состоянии при проведении контроля в моменты времени t^* на этапах ЛИ и эксплуатации определяется в виде ее точечной оценки по формуле

$$\hat{P}_{\text{ортс}}(t) = \prod_{j=1}^M \hat{P}_{\text{ортс}_j}(t),$$

где M – число блоков ССН на уровне составных частей КА; $\hat{P}_{\text{ортс}_j}(t)$ – точечная оценка вероятности работоспособного состояния (ВРС) i -го блока ССН КА (РН, РБ) в моменты времени t^* ; $\hat{P}_{\text{ортс}}(t)$ – точечная оценка ВРС КА; t^* – моменты времени, в которые осуществляется контроль ТС.

Точечная оценка показателя работоспособного состояния j -го блока ССН СЧ КК (в случае наличия резерва кратности K) определяется по формуле (в общем случае неравно надежных элементов в составе блока)

$$\hat{P}_{\text{ортс}_j}(t) = 1 - \prod_{l=1}^K \hat{P}_{0lj},$$

где \hat{P}_{0lj} – оценка показателя работоспособного состояния l -го элемента в j -м блоке ССН СЧ КК; K – число элементов в j -м блоке.

В свою очередь $\hat{P}_{0lj}(t) = 1 - m_{lj} / n_{lj}$, где m_{lj} – суммарное число отказов l -го элемента j -го блока, выявленных при проверках ТС в моменты времени t ; n_{lj} – общее число проверок соответствующей номенклатуры l -х элементов j -го блока в моменты времени t^* . Здесь принимается допущение о наличии не более одного отказа l -го элемента при контроле в момент t^* . Точечная оценка вероятности нахождения СЧ КК в исправном состоянии после проведения контроля в моменты времени t^* (апостериорная вероятность) определяется по статистическим данным по формуле

$$\hat{P}_{\text{итс}}(t) = \prod_{i=1}^N \hat{P}_{\text{итс}_i}(t),$$

где $\hat{P}_{\text{итс}}(t)$ – точечная оценка вероятности исправного состояния (ВИС) КА после контроля; $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ – точечная оценка ВИС i -го элемента ССН КА; N – общее число резервированных и нерезервированных элементов ССН КА.

Оценки $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ на этапах ЛИ и эксплуатации определяются по имеющимся статистическим данным, используя выражение: $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t) = 1 - m_i / n_i$, где m_i – суммарное число неисправных элементов i -го типа, не выявленных при контроле (проверках) ТС в соответствующие моменты времени t (при проведении ПСИ на ЗИ, при подготовке СЧ КК на ТК(СК) к пуску) и проявившихся на последующих этапах эксплуатации; n_i – суммарное количество проверок соответствующей номенклатуры (ПСИ на ЗИ либо проверки на ТК, либо проверки на СК), проведенных в соответствующие моменты времени t^* , за отчетный период.

Здесь принимается допущение о наличии не более одного отказа элемента i -го типа в момент t . Вероятность нахождения СЧ КК в работоспособном состоянии при проведении контроля в моменты времени на этапах ЛИ и эксплуатации определяется в виде ее точечной оценки показателя по статистическим данным по формуле

$$\hat{P}_{\text{ортс}}(t) = \prod_{j=1}^M \hat{P}_{\text{ортс}_j}(t),$$

где M – число блоков ССН на уровне составных частей СЧ КК; $\hat{P}_{\text{ортс}_j}(t)$ – точечная оценка вероятности работоспособного состояния (ВРС) j -го блока ССН СЧ КК после контроля, проведенного в

соответствующие моменты времени t ; $\hat{P}_{0\text{ркс}}(t)$ – точечная оценка ВРС СЧ КК; t^* – моменты времени, в которые осуществляется контроль ТС (ПСИ, ТК, СК). Точечная оценка показателя работоспособного состояния j -го блока ССН СЧ КК (в случае наличия резерва кратности K) определяется по формуле (в общем случае неравнонадежных элементов блока):

$$\hat{P}_{\text{ркс}_j}(t) = 1 - \prod_{l=1}^K (1 - \hat{P}_{lj}(t)),$$

где $\hat{P}_{lj}(t)$ – оценка показателя работоспособного состояния l -го элемента в j -м блоке ССН СЧ КК, признанной годном по результатам контроля (ПСИ, ТК, СК); K – число элементов в j -м блоке. В свою очередь $\hat{P}_{lj}(t) = 1 - m_{lj} / n_{lj}$, где m_{lj} – суммарное число отказов l -х элементов j -го блока, не выявленных при контроле ТС в моменты времени t^* и проявившихся при последующей эксплуатации (ТК, СК, полет); n_{lj} – общее число проверок определенной номенклатуры (ПСИ, ТК, СК) l -го элемента j -го блока в соответствующие моменты времени t .

Здесь принимается допущение о наличии не более одного отказа l -го элемента при контроле в момент t^* . Оценки апостериорных ВИС и ВРС СЧ КК на этапе НЭО проводятся расчетно-экспериментальным методом. Частота успешных пусков РН \bar{P} определяется по формуле: $\bar{P} = 1 - m_{\text{РН}} / n$, где $m_{\text{РН}}$ – количество неуспешных пусков; n – общее количество пусков.

Технический уровень СЧ КК Y : $Y = N / (N + G)$, где G – количество неисправных изделий СЧ КК, выявленных в контрольно-испытательной станции (КИС) и эксплуатирующей организации (ЭО); N – количество изделий СЧ КК, поступивших в ЭО [5].

Расчетные соотношения для определения частных показателей ТС КК

Относительное количество отказов и неисправностей СЧ КК q_3 , выявленных при подготовке СЧ КК к пуску, в процессе подготовки и в полете на одну РН: $q_3 = Q_{\text{экс}} / \gamma$, где $Q_{\text{экс}}$ – количество отказов и неисправностей, выявленных на ТК, СК и в полете; γ – количество СЧ КК, подготавливаемых к пуску.

Относительное количество отказов, выявленных в полете $q_{\text{отк}}$: $q_{\text{отк}} = Q_{\text{отк}} / \gamma$, где $Q_{\text{отк}}$ – количество отказов, выявленных в полете приведших к неуспешным или частично неуспешным пускам. Относительное количество неисправностей, выявленных при производстве $q_{\text{пр}}$:

$$q_{\text{пр}} = \frac{1}{N_{\text{пр}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{пр}}} Q_{\text{пр}_i},$$

где $Q_{\text{пр}}$ – количество неисправностей, выявленных при производстве; $N_{\text{пр}}$ – количество произведенных запусков СЧ КК.

Относительное количество конструктивных неисправностей K_k : $K_k = M_k / M_3$, где M_k – количество «закрытых» конструктивных неисправностей; M_3 – количество «закрытых» неисправностей. Относительное количество производственных неисправностей $K_{\text{пр}}$: $K_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} / M_3$, где $M_{\text{пр}}$ – количество «закрытых» производственных неисправностей. Относительное количество эксплуатационных неисправностей K_3 : $K_3 = M_3 / M_3$, где M_3 – количество «закрытых» эксплуатационных неисправностей. Коэффициент эффективности $\eta_{\text{пр}}$ контроля качества изготовления изделий (СЧ) КРК: $\eta_{\text{пр}} = Q_{\text{пр}} / (Q_{\text{пр}} + Q_{\text{прп}} + Q_{\text{пол}})$, где $Q_{\text{пр}}$ – количество отказов и неисправностей, выявленных при испытаниях изделий в процессе производства (входной контроль, сборка, КИС, ПСИ); $Q_{\text{прп}}$, $Q_{\text{пол}}$ – количество отказов и неисправностей производственного характера, выявленных при испытаниях изделий в процессе подготовки СЧ КК на ТК и СК, полете соответственно. Коэффициент эффективности $\eta_{\text{эк}}$ эксплуатационного контроля изделий СЧ КК: $\eta_{\text{эк}} = Q_{\text{эк}} / (Q_{\text{эк}} + Q_{\text{пэ}} + Q_{\text{полэ}})$, где

$Q_{\text{ЭК}}$ – количество отказов и неисправностей, выявленных при испытаниях изделий в процессе технического обслуживания и подготовки к пуску на ТК и СК; $Q_{\text{ПЭ}}$, $Q_{\text{ПолЭ}}$ – количество отказов и неисправностей производственного и эксплуатационного характера, выявленных при испытаниях изделий в процессе подготовки СЧ КК на ТК и СК, и в полете соответственно. Относительное количество отказов и неисправностей, причина которых не установлена, $K_{\text{ПНУ}} : K_{\text{ПНУ}} = M_{\text{ПНУ}} / M_3$, где $M_{\text{ПНУ}}$ – количество неисправностей и отказов «закрытых» с неустановленной причиной.

Относительное количество «закрытых» неисправностей q_3 (или коэффициент закрытия неисправностей, та же величина, выраженная в процентах): $q_3 = M_3 / Q_0$, где Q_0 – общее количество неисправностей, выявленных в СЧ КК за отчетный период. Относительное количество повторяющихся неисправностей $K_{\text{Повт}} : K_{\text{Повт}} = M_{\text{Повт}} / M_3$, где $M_{\text{Повт}}$ – общее количество повторяющихся неисправностей, выявленных на одну СЧ КК за отчетный период [6].

Относительное количество повторяющихся неисправностей по конструктивной причине $K_{\text{ПовтК}} : K_{\text{ПовтК}} = M_{\text{ПовтК}} / M_3$, где $M_{\text{ПовтК}}$ – количество повторяющихся неисправностей по конструктивной причине.

Относительное количество повторяющихся неисправностей по производственной причине $K_{\text{ПовтПр}} : K_{\text{ПовтПр}} = M_{\text{ПовтПр}} / M_3$, где $M_{\text{ПовтПр}}$ – общее количество повторяющихся неисправностей по производственной причине.

Относительное количество повторяющихся неисправностей по эксплуатационной причине $K_{\text{ПовтЭ}} : K_{\text{ПовтЭ}} = M_{\text{ПовтЭ}} / M_3$, где $M_{\text{ПовтЭ}}$ – общее количество повторяющихся неисправностей по эксплуатационной причине.

Все относительные показатели могут быть выражены в процентах путем умножения на 100 рассчитанной по соответствующим формулам величины показателя. Для построения ССН необходимо иметь схему деления СЧ КК, знать функциональные связи и взаимодействие между элементами схемы деления. По результатам ЛИ и эксплуатации необходимо иметь базу данных о техническом состоянии и надежности СЧ КК. Как правило, ведение базы данных должно осуществляться с использованием вычислительной техники. Банк данных должен храниться в течение всего периода эксплуатации СЧ КК. Обязательному учету и анализу подлежат все отказы и неисправности опытных и серийных изделий (включая дефекты, отступления от конструкторской и технологической документации, замечания), независимо от того, повлияли они на результаты испытаний (применение изделий по назначению) или не повлияли. При этом организации должны проводить всесторонние исследования причины отказов и неисправностей с учетом заинтересованных организаций и ПЗ на них.

Статистический метод определения периодичности диагностирования по допустимому уровню вероятности безотказной работы

Зная оптимальную периодичность диагностирования СЧ КК, можно технологически группировать отдельные диагностические операции, приурочивая их к соответствующим видам технического обслуживания. При этом объемы ТО претерпят корректировку, а эффективность его повысится.

В основе определения периодичности диагностирования l_d так же, как и при определении регламентной периодичности технического обслуживания l_p , лежат закономерности изменения технического состояния и экономические показатели. Однако l_d нельзя полностью отождествлять с l_p . Принципиально они различаются тем, что l_p находят из закономерностей отказов для регламентного ТО без учета затрат на диагностирование, а l_d – из закономерностей достижения механизмами предельных и упреждающих величин диагностических параметров с учетом затрат на диагностирование. Это различие между l_p и l_d определяет различие между традиционными контрольными работами, которые являются дополнением к уже запланированному ТО, и диагностированием, которое само планирует определенную часть ТО. При отсутствии данных, полученных на базе полномасштабного диагностирования, его временно приурочивают к существующей периодичности l_p .

Принципы определения периодичности l_p и l_d можно классифицировать по области применения (для единичных объектов и для совокупностей), по критерию оптимизации (безотказность, удельные затраты, коэффициент технической готовности), по ритмичности (жесткая равномерная периодичность, увеличенное время эксплуатации до первого контроля и учащение по мере наработки).

В области эксплуатации КС наиболее распространенными являются следующие методы определения l_d : статистический по допустимому уровню вероятности безотказной работы; индивидуальный по частной реализации диагностического параметра; экономико-вероятностный по совокупности реализаций диагностического параметра; экономико-вероятностный по дискретным значениям диагностического параметра. Остановимся на кратком описании тех методов, которые предназначены непосредственно для определения l_d . Указанный метод (рис. 1,а), т.е. по кривой убыви, прост и удобен. Однако этот метод неточен и неэкономичен, особенно при больших вариациях изменения технического состояния объекта. Он целесообразен для случаев технического обслуживания КС без диагностирования [7].

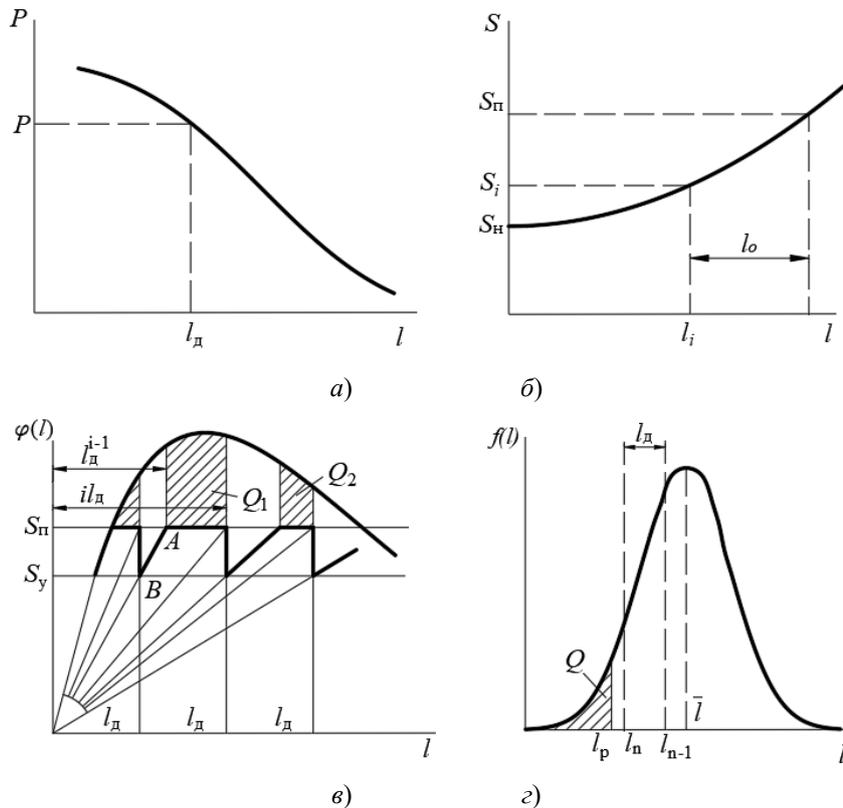


Рис. 1. Схема методов определения межконтрольных наработок:

- а – по заданной вероятности отказа; P – вероятность безотказной работы; l – наработка;
- б – по частной реализации, т.е. зависимости диагностического параметра S от наработки l ;
- в – по совокупности реализаций; $\varphi(l)$ – плотность распределения ресурса; з – по предотказному состоянию

Метод определения l_d по частной реализации (экстраполяционный метод) является при соответствующих условиях наиболее точным и достоверным (рис. 1,б). Сущность указанного метода заключается в решении относительно l_d функции, аппроксимирующей изменение диагностического параметра $S(l)$ от начальной S_n до предельной S_n величины. Пользуясь этой функцией, можно определить полный ресурс КС

$$l_d = \alpha \sqrt{\frac{|S_n - S_n|}{\nu}} \tag{1}$$

и их остаточный ресурс l_o после некоторой наработки l_i

$$l_o = l_i \left(\sqrt[\alpha]{\frac{|S_{ii} - S_{ii}|}{|S_i - S_{ii}|}} - 1 \right). \tag{2}$$

Здесь S_i – величина диагностического параметра после наработки l_i . Если диагностирование выполняют в системе заданной периодичности l_p , то остаточный ресурс l_o сравнивают с l_p и делают заключение о готовности КС (при $l_o > l_p$) или его потребности в ремонте (при $l_o < l_p$). Прогнозирование можно упростить, заменяя S_{ii} его упреждающим нормативом S_y , т.е. ужесточая S_{ii} на величину приращения диагностического параметра за период l_p .

Практическое применение метода определения l_d по частной реализации (при массовой эксплуатации) затрудняется необходимостью постоянного вычисления S_y для каждого механизма. Метод этот может быть использован для относительно дорогих механизмов, путем измерений параметров их выгорания.

Экономико-вероятностный метод определения l_d по совокупности реализаций диагностического параметра позволяет определить периодичность диагностирования, при которой можно пользоваться постоянной, единой для всей совокупности объектов величиной допустимого (упреждающего) норматива. Графическая интерпретация данной модели определения l_d и S_y показана на рис. 1,в. Метод статистического определения l_d по совокупности реализаций при заданных S_{ii} , S_y , $\varphi(l)$, $S = f(l)$, является универсальным. Сущность его заключается в оптимизации l_d по критерию минимума суммарных удельных затрат $C(l_d, S_y)$ на ремонт, профилактику и диагностирование. Из рис. 1 видно, что при увеличении l_d вероятности пропусков отказов, выраженные заштрихованными площадками Q_1, Q_2, \dots , возрастут. При этом число отказов, а следовательно, и затраты на ремонт увеличатся, а число плановых обслуживаний и диагностирований соответственно уменьшится. При уменьшении l_d будет наблюдаться обратная картина. Зная плотность распределения $\varphi(l)$, можно определить суммарную вероятность отказов [8, 9]:

$$Q(l_d, S_y) = \sum_{i=1}^n \int_{l^{i-1}}^{l^i} \varphi(l) dl, \tag{3}$$

где i – порядковый номер диагностирования; n – последний межконтрольный период, в котором могут быть отказы. Величину l^{i-1} можно определить из подобия прямоугольных треугольников $S_{ii}AO$ и S_yBO (см. рис. 1,в). При линейных реализациях ($\alpha = 1$) можно пользоваться уравнением $l^{i-1} = S_{ii}(i-1)l_d / S_y$.

При этом $n = 1 / (1 - S_y / S_{ii})$. При нелинейных реализациях ($\alpha \neq 1$):

$$l^{i-1} = \sqrt[\alpha]{S_{ii} / S_y} (i-1)l_d; \tag{4}$$

$$n = \frac{1}{1 - \sqrt[\alpha]{S_y / S_{ii}}}. \tag{5}$$

Пользуясь критерием минимума затрат, можно записать

$$C(l_d, S_y) = \min \left\{ \frac{cQ(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{d[1 - Q(l_d, S_y)]}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{c_d k(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} \right\}, \tag{6}$$

где c – стоимость аварийного ремонта; d – стоимость предупредительного ремонта; c_d – стоимость диагностической проверки; $k(l_d, S_y)$ – среднее число проверок до восстановления; $l_\phi(l_d, S_y)$ –

фактический ресурс, т.е. среднее время эксплуатации до замены. Очевидно, первый член уравнения (6) определяет затраты на ремонт, второй – на профилактику, а третий – на диагностирование.

При постоянном S_y рост l_d вызовет повышение вероятности аварийных ремонтов Q и затрат на них, так как l_ϕ изменится незначительно. При постоянном l_d уменьшение S_y приведет к снижению Q , но при этом существенно уменьшится l_ϕ , а $C(l_d, S_y)$ возрастет. Наибольшее $l_\phi(l_d, S_y)$ можно получить, уменьшая l_d и увеличивая S_y . Однако при этом резко возрастут затраты на диагностирование.

Для определения оптимальных значений l_d и S_y разработана номограмма для определения упреждающих значений диагностических параметров и межконтрольных пробегов, полученная путем решения с помощью ЭВМ уравнения (6) в широком диапазоне изменения входящих в него величин после их нормирования. Для определения с помощью номограммы оптимальной l_d необходимо знать затраты на диагностирование c_d , предупредительный ремонт d и устранение отказа c , средний ресурс \bar{l} , предельное S_{np} , значение диагностического параметра, коэффициент вариации ресурса, показатель функции наработки α .

Для того чтобы воспользоваться номограммой, пронормируем приведенные данные:

$$K = c/d; B^0 = c_d/d; l^0 = \bar{l}/l_d.$$

Здесь K – нормированная в долях d величина затрат на устранение пропущенного отказа; B^0 – нормированная стоимость диагностирования; l^0 – нормированная величина средней наработки диагностируемого механизма до достижения диагностическим параметром предельного значения. Переходя от нормированных величин к абсолютным, находят оптимальное значение S_y из произведения $S_y^0 S_r$. Если расхождение между l_d и l_p значительное, то корректировка возможна с помощью той же номограммы. Для этого, вычислив нормированное значение l^0 , находят для него оптимальное (скорректированное) значение S_y .

При эксплуатации составных частей космического комплекса, кроме дискретных затрат c и d , обусловленных стоимостью запасных частей и простоев при ремонте и диагностировании, имеют место и непрерывные затраты, которые, не вызывая отказа, снижают экономичность и эффективность работы всего комплекса. В этих случаях в формуле (6) величины c и d соответственно увеличиваются на составляющие непрерывных затрат, связанных с отказом $G_{от}$ и предупредительным обслуживанием (G_n). При этом уравнение (6) принимает вид [10, 11]

$$C(l_d, S_y) = \min \left\{ \frac{(c + G_{от})Q(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{(d + G_n)[1 - Q(l_d, S_y)]}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{c_d k(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} \right\}. \quad (7)$$

Экономико-вероятностный метод определения l_A при дискретных значениях диагностического параметра

Экономико-вероятностный метод определения l_d при дискретных значениях диагностического параметра (см. рис. 1, 2) применяется в тех случаях, когда используемый диагностический параметр и диагностические средства обеспечивают выявление неисправностей объекта диагностирования в данный момент, но не позволяют установить общую закономерность изменения его технического состояния в течение межконтрольного периода. Такое положение создается при значительном рассеивании процессов изменения технического состояния космического комплекса, что весьма характерно для изделий КК.

Использование дискретных диагностических параметров, с одной стороны, снижает точность прогноза, но, с другой – делает процесс выявления неисправностей более простым и технологичным.

Здесь целесообразно проводить оптимизацию l_d по минимуму суммарных эксплуатационных потерь Π , до восстановления. Эти потери определяются стоимостью всех диагностических прове-

рок до замены, а также дополнительными затратами на несвоевременное обнаружение неисправности. С уменьшением периодичности l_d первая составляющая, очевидно, возрастает за счет увеличения числа проверок; в то же время вторая составляющая и вероятность аварийных ремонтов уменьшаются. Можно показать, что математическое ожидание суммарных потерь (в предположении $l_d \ll \bar{l}$)

$$M(\Pi_3) = c_d (\bar{l} / l_d + 0,5) + c' l_d / 2,$$

где c' – дополнительные удельные затраты при несвоевременном обнаружении неисправности. Из условия $\min \Pi_3$ находим оптимальную периодичность [12]

$$l_d^{opt} = \sqrt{2c_d \bar{l} / c'}. \tag{8}$$

Удельные затраты c' определяются из следующих соображений. При планово-предупредительной системе ТО, когда средний фактический период эксплуатации КК диагностируемого составляет $l_\phi < \bar{l}$, затраты на ТО близки к затратам d на предупредительный ремонт. При системе обслуживания по потребности, когда время эксплуатации равно среднему ресурсу \bar{l} КС, эти затраты будут равны затратам c на восстановление пропущенного отказа. Поэтому разность между c и d , отнесенная к разности между соответствующими пробегами \bar{l} и l_ϕ , будет представлять собой удельные затраты c' , т.е.

$$c' = \frac{c-d}{\bar{l}-l_\phi} = \frac{d(k-l)}{\bar{l}(1-l_\phi/\bar{l})}, \tag{9}$$

где c – стоимость восстановления пропущенного отказа; d – стоимость предупредительного обслуживания; k – коэффициент, выражающий затраты на ремонт из-за пропущенного отказа в долях затрат на предупредительный ремонт; l_ϕ – средний фактический ресурс диагностируемого космического аппарата до ремонта или обслуживания, который определяется [13, 14] выражением

$$l_\phi = l_p P + \int_0^{l_p} l f(l) dl, \tag{10}$$

где l_p – регламентное время между плановыми обслуживаниями; P – вероятность безотказной работы за межремонтную эксплуатацию; $f(l)$ – плотность распределения ресурса до первого отказа.

После соответствующих преобразования получим

$$l_d^{opt} = A \bar{l} \sqrt{2c_d / (c-d)},$$

где A – коэффициент, зависящий от вида функции $f(l)$ и, в первую очередь, от ее коэффициента вариации v . Переходим к нормированным величинам

$$\mu^{opt} = l_d^{opt} / \bar{l}; k = c / d; \varepsilon = c_d / d, \mu^{opt} = A(v) \sqrt{2\varepsilon / (k-1)}. \tag{11}$$

Так как удельные затраты при системе ТО с плановым диагностированием не должны превышать удельные затраты при планово-предупредительной системе без диагностирования, то необходимо выполнение условия

$$\frac{d + M(\Pi_3)}{\bar{l}} \leq \frac{dP + c(1-P)}{l_\phi}. \tag{12}$$

Отсюда можно найти предельное значение коэффициента стоимости диагностирования $\varepsilon^{opt}(k, v)$, при котором ее внедрение экономически целесообразно. Представляя это значение в уравнение (11), получим окончательно некоторую сложную зависимость, которая представлена в виде номограммы (рис. 2), позволяющей определить оптимальную периодичность диагностирования по

среднему ресурсу \bar{T} диагностируемого механизма, рассеиванию его долговечности (коэффициенту вариации v) и соотношению между затратами на вынужденный и предупредительный ремонты [15].

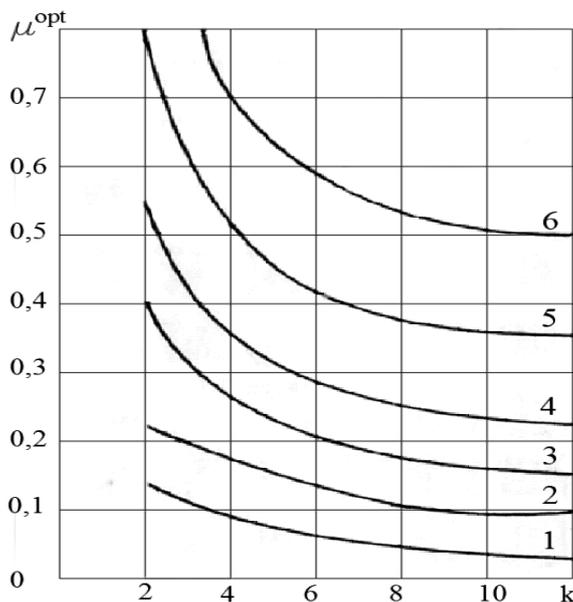


Рис. 2. Номограмма определения оптимальной периодичности μ^{opt} диагностирования при различных коэффициентах вариации v :
 1 – $v = 0,2$; 2 – $v = 0,3$; 3 – $v = 0,4$; 4 – $v = 0,5$; 5 – $v = 0,6$; 6 – $v = 0,7$

Пользуясь описанной методикой и соответствующими статистическими данными показателей надежности КК, можно определить оптимальные периодичности их диагностирования и составить рациональный технологический процесс ТО, обеспечивающий минимум текущего ремонта.

Дальнейшее совершенствование методик прогнозирования исправной работы КК возможно на основе оперативной корректировки диагностических нормативов, а также путем применения переменной периодичности диагностирования в зависимости от наработки и технического состояния диагностируемого реактора. Для этого необходимы автоматизированные диагностические комплексы, входящие в АСУ и позволяющие оперативно управлять режимами технического обслуживания.

Постановка диагноза

Постановка диагноза, т.е. заключение о техническом состоянии диагностируемого реактора, имеет цель определить его пригодность к эксплуатации в настоящее время и в будущем за время эксплуатации до очередного обслуживания.

Из этого следует, что при плановом диагностировании постановка диагноза содержит элементы прогнозирования ресурса исправной работы КК.

Для уменьшения эксплуатационных затрат применяют два вида диагноза, различающиеся по глубине: общий и поэлементный. Диагноз работоспособности агрегата, системы, реактора в целом называют общим, а детальный диагноз, определяющий причины снижения работоспособности, – поэлементным. Как общий, так и поэлементный диагноз используют для управления технологическими процессами и качеством обслуживания реактора. По результатам общего диагноза КА подвергают поэлементному диагностированию или направляют в эксплуатацию, а по результатам поэлементного производят ремонт или обслуживание. Кроме того, заключительный диагноз используют для контроля качества ТО и ремонта КА. Постановка диагноза состояния относительно простых механизмов, когда приходится пользоваться одним диагностическим параметром, не встречает особых методических затруднений [16, 17].

Она практически сводится к измерению величины диагностического параметра S , по сравнению ее с нормативом.

Здесь система из n уравнений (где n – число структурных параметров X , каждый из которых может быть связан с m измеряемых диагностических параметров) описывает все возможные состояния объекта диагностирования, выраженные диагностическими параметрами S . Для практического составления этих уравнений необходимо знать перечень характерных неисправностей реактора, подлежащих выявлению, и структурно-следственную схему соответствующего диагностируемого механизма. Перечень характерных неисправностей механизма составляют на основе статистических показателей его надежности. Пользуясь подобной схемой, составленной на основе инженерного изучения объекта диагностирования, можно применительно к данному перечню неисправностей установить первоначальный перечень диагностических параметров и связи между теми и другими. Однако составленные таким образом логические уравнения, каждое из которых представляет горизонтальную строку матрицы, могут оказаться недостаточно информативными, поскольку структурно-следственные схемы не содержат количественной оценки диагностических параметров. Для того чтобы оценить значимость диагностических параметров, следует проанализировать их качества: чувствительность, информативность по вероятностям их возникновения при наличии данной неисправности или по вероятностным связям с основными параметрами работоспособности объекта диагностирования. При относительно малых вероятностях параметр считается малозначачим и приравнивается нулю. В противном случае он приравнивается единице. Подобранные таким образом диагностические параметры позволяют заполнять нулями и единицами соответствующие клетки матрицы. Подобная матрица дает возможность решить задачу локализации неисправности диагностируемого механизма по наличию соответствующего комплекса диагностических параметров, достигших нормативной величины. Физическая сущность решения данной задачи заключается в исключении неисправностей, несовместимых с существованием определенной комбинации измеренных диагностических параметров. Процесс выявления неисправности можно рассматривать как снижение энтропии (степени неопределенности технического состояния диагностируемого механизма) путем последовательного введения в диагностическую матрицу доз информации, несомой диагностическими параметрами, достигшими нормативной величины.

Для практической постановки диагноза матрицу выполняют в виде электронного прибора, к которому подводятся электрические сигналы, соответствующие измеряемым диагностическим параметрам. При достаточной силе эти сигналы проходят через пороговое устройство (триггер) в свою электрическую цепь. По цепи сигнал направляется в элемент совпадения контрольной лампы x_1, x_2 и т.д., соответствующей той неисправности, при которой возможно существование данного диагностического параметра. Если лампа не загорится, то это будет означать, что доза информации, полученная от данного диагностического параметра, недостаточна для локализации имеющейся неисправности и что для постановки диагноза требуется ввод дополнительной информации от других диагностических параметров. Так, например, сигнал неисправности x_1 поступит только после ввода сигналов от двух параметров S_2 и S_4 , сигнал неисправности x_2 – после ввода S_1 и S_3 и т.д. Следовательно, алгоритм функционирования данного логического устройства: $x_1 = S_2 S_4$; $x_2 = S_1 S_3$; $x_3 = S_1 S_2 S_4$; $x_4 = S_2 S_3$; $x_5 = S_1 S_3 S_4$. Подобные устройства позволяют локализовать неисправности и выводить информацию по соответствующим каналам в центральный пункт управления или на табло оператора. При необходимости ввода скорректированных диагностических показателей производится регулировка пороговых устройств. Наличие переключателей позволяет перестраивать диагностическую матрицу на другие диагностические параметры. Логическая матрица указанного вида может быть основой синтеза логических автоматов для определения технического состояния объекта диагностирования путем автоматической локализации неисправностей. В случаях когда локализация неисправностей при помощи диагностической матрицы затруднительна, например, из-за небольшого числа измеряемых диагностических параметров и сильного пересечения классов состояния, для постановки диагноза могут быть использованы теория и технические средства распознавания образов. Совокупности реализаций диагностических параметров для любого механизма (т.е. их величин, зафиксированных в какой-либо системе координат) представляют собой некоторые множества, обладающие характерными свойствами. Эти свойства проявляются в том, что ознакомление людей или машины (распознающего устройства) с реализациями указанных множеств дает возможность в дальнейшем распознавать принадлежность данной реализации к какому-либо из этих множеств. Множества такого типа называют образами. Совокупности различных технических состояний объекта диагностирования обозначают в том случае так называемым «алфавитом» неисправностей: $A = A_0, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_M$, где A_0 – состояние технически исправного объекта;

A_i – класс состояния объекта, выраженный совокупностью реализаций конкретной неисправности; M – число классов возможных состояний объекта. Задача распознавания неисправностей заключается в отнесении полученной при диагностировании реализации диагностического параметра, выражающего состояние диагностируемого механизма, к соответствующему классу A_i . При этом к одному классу относятся реализации, обладающие общими свойствами. Если измерить диагностические параметры нескольких одинаковых, исправных механизмов, то реализации параметров, полученные при диагностировании, образуют соответствующую область. При этом они будут группироваться относительно некоторого центра распределения, называемого эталоном A_0 (рис. 3 и 4). Возникновение в этих же механизмах какой-либо определенной неисправности вызовет смещение области реализации и ее эталона A_{i_3} в другое место. Наличие другой неисправности снова изменит местоположение области реализаций диагностических параметров и эталона A_{i_2} , и т.д. Если местоположение областей характерных неисправностей механизма известно, можно определить неизвестную неисправность, зная реализацию, полученную при диагностировании, по ее соответствию, принадлежности к тому или иному классу состояний объекта диагностирования [19].

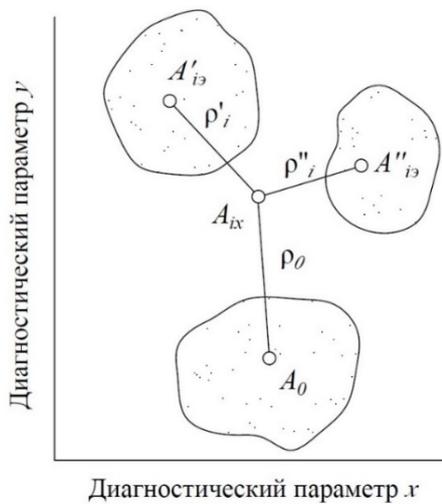


Рис. 3. Схема распознавания образов по расстоянию ρ между измеренной реализацией A_{ix} , эталоном неисправностей A'_{i_3} , A''_{i_3} и эталоном исправного состояния объекта A_0

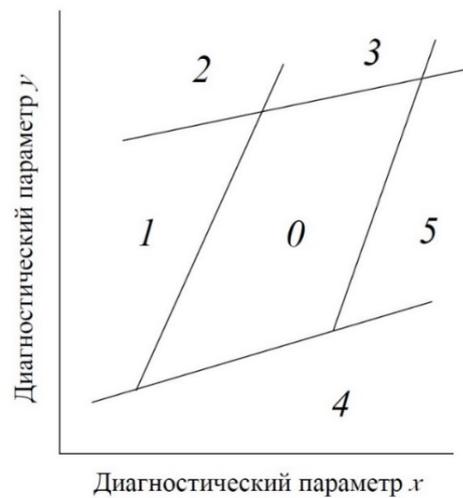


Рис. 4. Схема распознавания образов по включению измеренной реализации A_{ix} в области исправных состояний 0 или соответствующих неисправных состояний 1, 2, 3, 4, 5

Следовательно, распознавание технического состояния данного механизма можно понимать как установление того факта, что образ A_{ix} похож на эталонный образ A_{i_3} , считая, что степень схожести определяется расстоянием между реализацией A_{ix} и эталоном A_{i_3} . Возможны два способа распознавания неисправностей: по включению полученной реализации (образа) внутрь области неисправных состояний и по расстоянию между его центром распределения A_{ix} и эталоном A_{i_3} . В первом случае материал, на котором формируют получение эталонов (он называется обучающей последовательностью), выражается границами между областями характерных неисправностей (рис. 3). Во втором случае распознавание сводится к определению расстояния между A_{ix} и A_{i_3} :

$$\rho(A_{ix}, A_{i_3}) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{kx} - X_{ki_3})^2}, \tag{14}$$

где X_{kx} и X_{ki_3} – значения диагностических параметров (реализаций), предъявленных к распознаванию; N – число диагностических параметров, характеризующих алфавит неисправностей.

Представив величины диагностических параметров, например, в координатах y – время износа, x – перемещение КА (см. рис. 4), можно получить область исправных состояний, аналогичную

области 0, и области 1–5 характерных неисправностей КА (увеличение зазора и т.д.). Подобные неисправности можно выявлять с помощью относительно недорогих электронных приборов.

Описанный метод применения теории распознавания образов для диагностирования реакторов может быть использован и для других механизмов. Он позволяет определять техническое состояние КК непосредственно в процессе эксплуатации.

Общий процесс диагностирования

Постановка диагноза состоит в сравнении полученного одного или нескольких прошедших обработку диагностических параметров с заданными нормативами. В простейшем случае при использовании единичного диагностического параметра процедура диагностирования на этом заканчивается. Превышение S_y означает потребность в техническом воздействии установленного объема, а отсутствие превышения – возможность эксплуатации до очередного контроля.

При использовании для диагноза большого числа параметров применяют методы синтеза и анализа обработки снятой информации. Процесс диагностирования путем синтеза дифференцированной информации, полученной с помощью нескольких датчиков, и путем анализа обобщенной информации, зафиксированной одним датчиков, показан на принципиальной схеме (рис. 5).

Сущность процесса диагностирования сложного объекта путем синтеза дифференцированной информации заключается в следующем. Диагностируемый механизм, как правило, подвергается тестовому воздействию. При этом датчики D_1, D_2, \dots, D_n фиксируют величины структурных параметров X_1, X_2, \dots, X_n каждого из элементов объекта $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$. Значения структурных параметров, выраженные электрическими сигналами S_1, S_2, \dots, S_n , поступают в блок усиления и после обработки в пороговое устройство. Последнее пропускает сигналы, превышающие допустимые значения S_y . Эти сигналы $S''_1, S''_2, \dots, S''_m$ поступают в логическое устройство (диагностическую матрицу). Матрица синтезирует информацию, полученную от нескольких датчиков, и выдает диагноз. Диагноз может быть уточнен путем дифференцирования потребного воздействия на конкретные виды: предупредительное или ремонт [20].

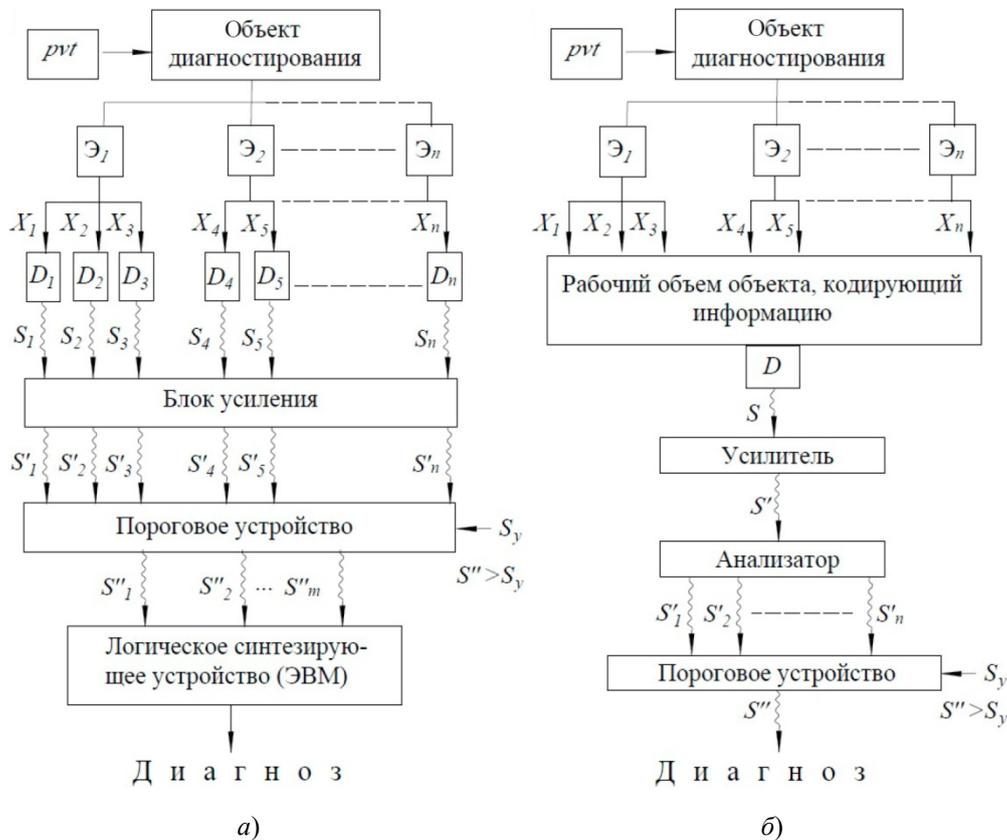


Рис. 5. Процесс диагностирования технического состояния сложного объекта с использованием различных методов получения и обработки информации: а – метод синтеза; б – метод анализа

Процесс диагностирования путем анализа обобщенной информации отличается от описанного тем, что изменение структурных параметров X_1, X_2, \dots, X_n группы элементов объекта фиксируют интегрально с помощью одного датчика (например, пьезодатчика параметров вибрации). После усиления сигнал, заключающий в себе обобщенную информацию о техническом состоянии объекта, необходимо анализировать, выделяя наиболее характерные и полезные составляющие. Затем эти составляющие фильтруют по величине с помощью порогового устройства и ставят диагноз. При диагностировании несложных объектов описанный процесс упрощают путем исключения отдельных этапов.

Диагностирование сложных механизмов часто требует автоматизации. При этом предписанная последовательность определяется соответствующим алгоритмом. Алгоритм диагностирования определяет: выведение объекта (КА, агрегата) на тестовый режим; обработку сигнала, т.е. постановку первоначального диагноза (оценку работоспособности); при необходимости осуществляют углубленный поиск неисправности (поэлементная диагностика), переход к следующему элементу объекта. Таким образом, алгоритм диагностирования состоит из синтеза алгоритмов определения работоспособности и поиска неисправностей. Вертикальная ветвь этого алгоритма представляет систему последовательного поиска основного алгоритма. Возможны два исхода: положительный, если выходной параметр не превышает нормы (на рис. 5 «Да»), и отрицательный «Нет». В первом случае осуществляют очередной шаг (по стрелке вниз), во втором – начинают поиск неисправности по особому алгоритму (боковые ветви). Алгоритм работоспособности и алгоритм неисправностей строятся с учетом особенностей объекта, информативности очередного диагностического параметра, технологичности процесса, информационного и экономического критерия. Экономический критерий:

$$\bar{c} = \sum_i^n c_i P_i,$$

где \bar{c} – средняя стоимость проверки; c_i – результирующая стоимость проверки для нахождения отказавшего i -го элемента; P_i – вероятность того, что отказ обусловлен i -м элементом.

Если данные о вероятностях отказов отсутствуют, то можно использовать критерий минимакса. При этом оптимальным считается алгоритм, при котором максимальная стоимость поиска отказавшего элемента является наименьшей по сравнению с другими вариантами. Подобные алгоритмы закладываются также в основу технологических процессов диагностирования КС и диагностических матриц (таблиц).

Заключение

Одним из основных факторов, обеспечивающих высокий уровень технического состояния космических комплексов, космических аппаратов, средств выведения и других изделий ракетно-космической техники является наличие развитой нормативной базы, которая устанавливает единый подход к порядку их создания, производству и эксплуатации, который основан на последних достижениях науки и техники. К одному из важнейших элементов данной нормативной базы относится комплекс нормативных документов, устанавливающих требования к обеспечению необходимого уровня технического состояния. В силу сложившейся за десятилетия практики создания, производства и эксплуатации изделий РКТ решение вопросов обеспечения высокого уровня технического состояния изделий РКТ всегда являлось первоочередной задачей. Подобный подход позволил создать комплекс нормативных документов высокого научно-технического уровня, сформировать достаточно эффективно действующие организационные структуры, внедрить в организациях ракетно-космической промышленности высокую культуру безопасности.

Показателем эффективности данных работ явилось то, что, несмотря на имевший место ряд аварий, включая аварии, связанные с потерей ракет-носителей и полезной нагрузки, значительными финансовыми потерями при этом, удалось избежать масштабных негативных последствий, связанных с нанесением вреда персоналу, населению и окружающей среде.

Цели и задачи обеспечения высокого уровня технического состояния космических комплексов, космических аппаратов, средств выведения и других изделий ракетно-космической техники определяются долгосрочными целями и задачами космической деятельности России и направлены на достижение этих целей и на сохранение статуса России как космической державы и лидера на

мировом космическом рынке. АС является объектом повышенной опасности: ввиду этого все оборудование, используемое во время эксплуатации, подвергается различного рода восстановительным мероприятиям (методологическое обеспечение, профилактика, контроль исправности). Как следствие этого, к концу срока эксплуатации оно находится, как правило, во вполне работоспособном состоянии. Тогда встает вопрос о возможном продлении срока эксплуатации. Если такое решение обоснованно, то это дает большие экономические выгоды. Исключительно важную роль играет анализ надежности оборудования с учетом старения, на основании которого можно делать выводы о продлении срока эксплуатации. На данный момент большинство методов учета старения основаны на исследовании поведения интенсивности отказов, описываемых функциями, возрастающими во времени. Среди совокупности мероприятий, обеспечивающих поддержание работоспособности систем АС на высоком уровне, одно из ведущих мест занимают вопросы методологического обеспечения. Техническое обслуживание связано с анализом состояния системы и проведением, в случае необходимости, комплекса восстановительных работ. Под восстановительными мероприятиями понимается некоторое воздействие на систему, целью которого является либо определение состояния системы и ликвидация отказа, либо улучшение характеристик безотказности. Можно предложить несколько алгоритмов для определения программы эксплуатации системы, которые делятся на три основные группы. Так, например, эксплуатация системы по заданному ресурсу. Применяется для элементов системы стареющего типа, у которых интенсивность отказов является возрастающей во времени функцией. Для этой методики существует ряд стратегий, в которых предусмотрено полное восстановление системы. Эксплуатация систем по состоянию основана на периодическом измерении некоторых параметров системы, которые изменяются в результате действия внешних факторов и старения. На основании наблюдений принимается решение о проведении того или иного вида работ по обслуживанию системы, т.е. организация обслуживания осуществляется в зависимости от фактического состояния системы.

Библиографический список

1. Павлов, И. В. Статистические методы оценки надежности сложных систем / И. В. Павлов. – Москва : Радиосвязь, 1982. – 168 с.
2. Сидняев, Н. И. Теория вероятностей и математическая статистика // Н. И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2011. – 310 с.
3. Геча, В. Я. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке / В. Я. Геча, Р. Н. Барбул, Н. И. Сидняев, Ю. И. Бутенко // Надежность. – 2019. – № 2. – С. 3–8.
4. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965. – 524 с.
5. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учеб. пособие / Н. И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2011. – 399 с.
6. Морозов, Д. В. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре / Д. В. Морозов, С. Ф. Чермошенцев // Надежность. – 2019. – № 19 (1). – С. 30–35.
7. Сидняев, Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н. И. Сидняев, Г. С. Садыхов, В. П. Савченко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 382 с.
8. Morris, S. F. Use and application of MIL-HDBK-217 / S. F. Morris // Solid Slate Technology. – 1990. – Vol. 33, № 6. – P. 65–69.
9. Сидняев, Н. И. Математическое моделирование оценки надежности объектов сложных технических систем / Н. И. Сидняев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 4. – С. 24–31.
10. Brennom, T. R. Should us MIL-HDBK-217 be 8888 / T. R. Brennom // IEEE Trans. Reliab. – 1988. – Vol. 37, № 5. – P. 474–475.
11. Сидняев, Н. И. Обзор и исследование физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных РЛС / Н. И. Сидняев // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6, № 2 (23). – С. 4–52.
12. Барлоу, Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – Москва : Советское радио, 1969. – 488 с.
13. РД 50–690–89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Введ. 1991–01–01. – Москва : Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.
14. Сидняев, Н. И. Факторы космической погоды, влияющие на бортовые элементы низкоорбитальных космических аппаратов / Н. И. Сидняев, Л. А. Макриденко, В. Я. Геча, В. Н. Онуфриев // Вопросы электро-

- механики : тр. Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 90–100.
15. Похабов, Ю. П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов / Ю. П. Похабов // Надежность. – 2018. – № 4. – С. 28–35.
 16. Антонов, С. Г. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий / С. Г. Антонов, С. М. Климов // Надежность. – 2017. – № 17 (1). – С. 32–39.
 17. Сидняев, Н. И. О современных подходах развития теории эффективности космических систем / Н. И. Сидняев, В. Я. Геча, Р. Н. Барбул / Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Москва, 18 апреля 2018 г.). – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 69–75.
 18. Климов, С. М. Методика повышения отказоустойчивости сетей спутниковой связи в условиях информационно-технических воздействий / С. М. Климов, С. В. Поликарпов, А. В. Федченко // Надежность. – 2017. – № 17 (3). – С. 32–40.
 19. Колобов, А. Ю. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов / А. Ю. Колобов, Е. В. Дикун // Надежность. – 2017. – № 17 (4). – С. 31–35.
 20. Сидняев, Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н. И. Сидняев, Г. С. Садыхов, В. П. Савченко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 382 с.

References

1. Pavlov I. V. *Statisticheskie metody otsenki nadezhnosti slozhnykh sistem* [Statistical methods for evaluating the reliability of complex systems]. Moscow: Radiosvyaz', 1982, 168 p. [In Russian]
2. Sidnyaev N. I. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Yurayt, 2011, 310 p. [In Russian]
3. Gecha V. Ya., Barbul R. N., Sidnyaev N. I., Butenko Yu. I. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2019, no. 2, pp. 3–8. [In Russian]
4. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in reliability theory]. Moscow: Nauka, 1965, 524 p. [In Russian]
5. Sidnyaev N. I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh: ucheb. posobie* [Theory of experiment planning and analysis of statistical data: textbook]. Moscow: Yurayt, 2011, 399 p. [In Russian]
6. Morozov D. B., Chermoshentsev S. F. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2019, no. 19 (1), pp. 30–35. [In Russian]
7. Sidnyaev N. I., Sadykhov G. S., Savchenko V. P. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki* [Models and methods for estimating the remaining life of radio electronics products]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2015, 382 p. [In Russian]
8. Morris S. F. *Solid Slate Technology*. 1990, vol. 33, no. 6, pp. 65–69.
9. Sidnyaev N. I. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2003, no. 4, pp. 24–31. [In Russian]
10. Brennom T. R. *IEEE Trans. Reliab.* 1988, vol. 37, no. 5, pp. 474–475.
11. Sidnyaev N. I. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya* [Physical fundamentals of instrumentation]. 2017, vol. 6, no. 2 (23), pp. 4–52. [In Russian]
12. Barlou R., Proshan F. *Matematicheskaya teoriya nadezhnosti* [Mathematical theory of reliability]. Moscow: Sovetskoe radio, 1969, 488 p. [In Russian]
13. RD 50–690–89. *Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody otsenki pokazateley nadezhnosti po eksperimental'nym dannym* [RD 50-690-89. Methodical instructions. Reliability in technology. Methods for evaluating reliability indicators based on experimental data]. Vved. 1991–01–01. Moscow: Gos. komitet SSSR po upravleniyu kachestvom produktsii i standartam, 1990. [In Russian]
14. Sidnyaev N. I., Makridenko L. A., Gecha V. Ya., Onufriev V. N. *Voprosy elektromekhaniki: tr. Chetvertoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli»* [Issues of electrical engineering : proc. The Fourth Intern. scientific-technical Conf. "Actual problems of creating space systems for remote sensing of the Earth"]. Moscow: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016, pp. 90–100. [In Russian]
15. Pokhabov Yu. P. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2018, no. 4, pp. 28–35. [In Russian]
16. Antonov S. G., Klimov S. M. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2017, no. 17 (1), pp. 32–39. [In Russian]
17. Sidnyaev N. I., Gecha V. Ya., Barbul R. N. *Sistemy upravleniya polnym zhiznennym tsiklom vysokotekhnologichnoy produktsii v mashinostroenii: novye istochniki rosta: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Moskva, 18 aprelya 2018 g.)* [Systems for managing the full life cycle of high-tech products in mechanical engineering: new sources of growth: materials vseros. scientific-practical Conf. (Moscow, April 18, 2018)]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2018, pp. 69–75. [In Russian]

18. Klimov S. M., Polikarpov S. V., Fedchenko A. V. *Nadezhnost'* [Reliability 2017, no. 17 (3), pp. 32–40. [In Russian]
19. Kolobov A. Yu., Dikun E. V. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2017, no. 17 (4), pp. 31–35. [In Russian]
20. Sidnyaev N. I., Sadykhov G. S., Savchenko V. P. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki* [Models and methods for estimating the remaining life of radio electronics products]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2015, 382 p. [In Russian]

Сидняев Николай Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой высшей математики,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5)
E-mail: Sidn_ni@mail.ru

Sidnyaev Nikolay Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of higher mathematics,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Уракова Карина Айратовна

магистрант,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5)
E-mail: urakovakarina13@gmail.com

Urakova Karina Ayratovna

master degree student,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Сидняев, Н. И. Метод определения периодичности диагностирования космических систем по допустимому уровню вероятности безотказной работы / Н. И. Сидняев, К. А. Уракова // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 47–67. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-7.