

УДК 621.396

**Методика обоснования возможности и условий продления
назначенных показателей срока службы антенных систем наземных
станций измерительного комплекса космодрома**

Миронов А.Н.*, Цветков К.Ю., Ковальский А.А.***, Пальгунов В.Ю.******

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: mironov-anik@yandex.ru*

***e-mail: wavelet3@mail.ru*

****e-mail: sake636@mail.ru*

*****e-mail: palgunov_vl_yur@mail.ru*

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы разработки методики обоснования возможности и условий продления назначенных показателей срока службы антенных систем (АС) наземных станций (НС) измерительного комплекса космодрома (ИКК).

Объектом исследования является АС НС ИКК. Предметом исследования являются процессы и научно-методическое обеспечение обоснования возможности и условий продления назначенных показателей срока службы АС НС ИКК.

Цель исследований состоит в разработке научно-методического обеспечения для обоснования возможности и условий продления назначенных показателей срока службы АС НС ИКК по фактическому состоянию с учетом ограниченного объема исходных данных о надежности элементной базы и возможностях восстановления

отказов.

В работе проведен системный анализ подходов к оценке технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса АС НС ИКК, а также предложены математическая модель достижения предельного состояния АС НС ИКК и алгоритм прогнозирования остаточного ресурса (срока службы) АС НС ИКК.

Применение предложенного в статье научно-методического аппарата позволит повысить обоснованность решений по управлению эксплуатацией АС НС ИКК, обеспечить их надежное и безопасное функционирование при экономии материальных и финансовых средств.

Ключевые слова: оценка технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса, продление назначенных показателей срока службы, антенная система, измерительный комплекс космодрома.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации (РФ) разработана и утверждена «Федеральная космическая программа России на 2016-2025 годы». Успешное выполнение данной государственной программы невозможно без развертывания, восполнения и управления функционированием орбитальных группировок космических аппаратов. При этом важная роль отводится операциям: контроля всех этапов подготовки пуска и пуска ракет космического назначения; контроля выведения полезной нагрузки на заданную орбиту; последующего управления космических аппаратов в орбитальном полете. Выполнение данных задач возложено на измерительный комплекс космодрома (ИКК).

Типовым средством ИКК является наземная станция (НС), содержащая

антенную систему, которая, в свою очередь включает в себя опорно-поворотное устройство (ОПУ), зеркальную систему (антенную решетку) и комплект радиочастотного оборудования. Устройство типовой АС НС ИКК изображено на рис. 1.

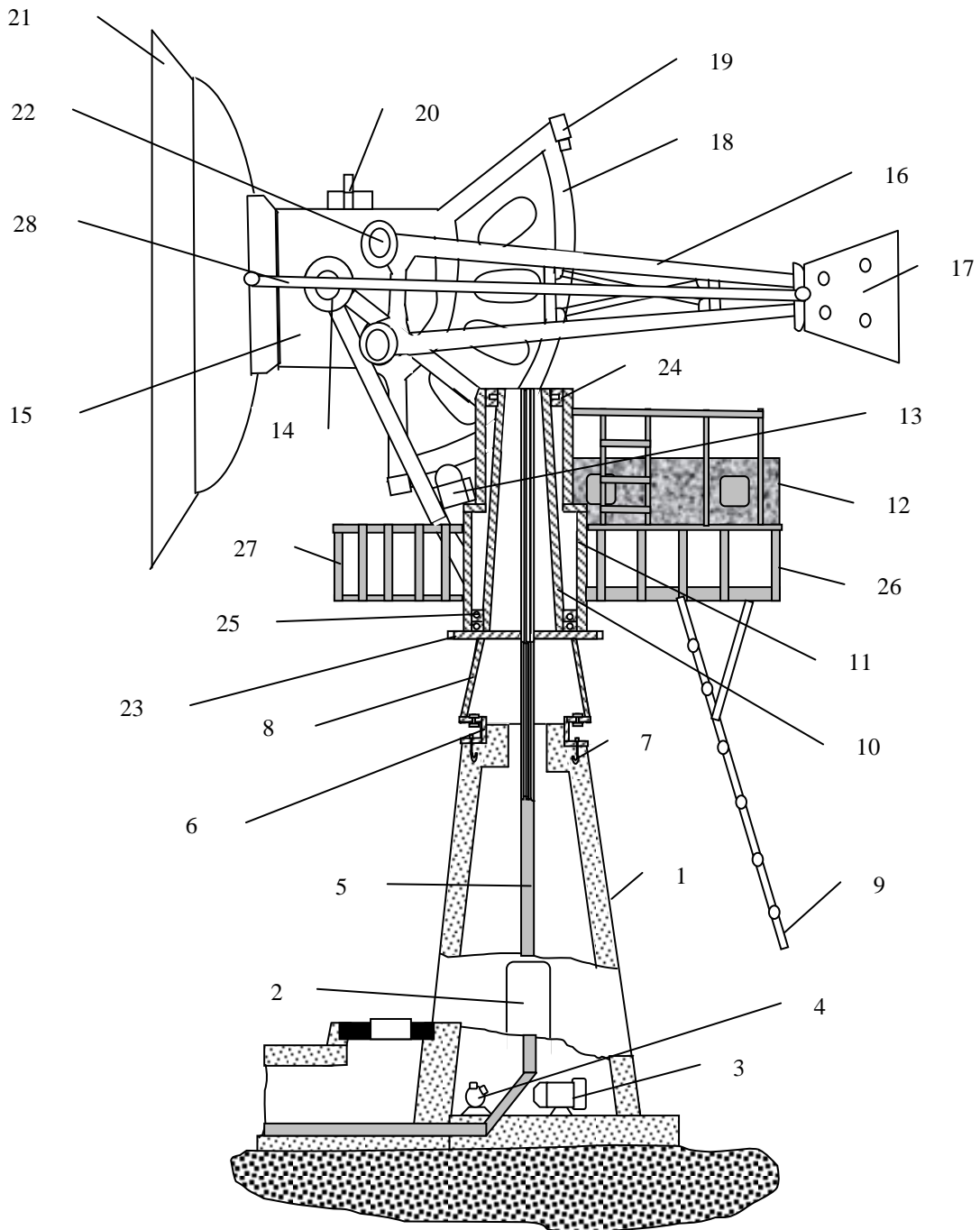


Рисунок 1. – Устройство типовой АС НС ИКК

На рис. 1 цифрами обозначены следующие элементы АС НС ИКК:

1 – пилон (в зависимости от модификации АС может быть выполнен в различном исполнении);

2 – дверь;

3, 4 – электрооборудование, размещенное в пилоне;

5 – кабели;

6 – закладное кольцо;

7 – анкерные болты;

8 – основание с механизмом стопорения;

9 – лестница;

10 – вертикальная ось;

11 – станок с кожухами;

12 – кожухи;

13 – привод угла места;

14 – горизонтальная ось;

15 – подцапфенная балка с секторами и противовесами;

16 – рама противовеса;

17 – груз противовеса;

18 – сектор;

19 – копир механизма ограничения угла наведения по углу места;

20 – установка корзины панорамы;

21 – антенная решетка;

22 – эксцентричная цапфа;

23 – зубчатый обод;

24, 25 – верхний и нижний подшипниковые узлы вертикальной оси;

26 – площадки и ограждения;

27 – передняя площадка;

28 – тяга противовеса.

Эксплуатация НС на космодромах РФ характеризуется следующими особенностями:

– надежность оборудования АС НС снижается вследствие ухудшения параметров технического состояния в процессе длительной эксплуатации. Большинство НС ИКК изготовлены в 70-х – 80-х годах и введены в эксплуатацию в период с 1970 по 1985 год. Средний срок эксплуатации составляет более 27 лет, при гарантийном сроке – 10 лет;

– узлы и механизмы ОПУ (металлоконструкции, приводы наведения, электрооборудование приводов наведения) эксплуатируются на открытом воздухе в условиях существенной сезонной разности температур, от -35°C зимой до $+45^{\circ}\text{C}$ летом, и влажности от 5% до 95% соответственно. Эти причины вызывают повышенный износ ряда механических, электромеханических элементов ОПУ АС, контрольных кабелей, которые необходимо восстанавливать или заменять;

– в условиях недостаточного финансирования модернизации и обновления, существующего парка АС НС возрастает актуальность задачи продления назначенных показателей срока службы АС НС ИКК с выборочным восстановлением запаса остаточного срока службы наиболее критичных элементов оборудования.

В то же время практика эксплуатации показывает, что возможности

восстановления работоспособного состояния оборудования АС НС ограничиваются из-за исчерпания ЗИП и снятия с производства отдельных комплектующих, а также ограниченного финансирования ремонтных работ.

Кроме того, ограниченность исходных данных о надежности элементной базы АС НС ИКК и о возможностях восстановления работоспособного состояния оборудования затрудняет получение достоверных прогнозов остаточного срока службы элементов оборудования и соответственно – обоснование сроков и объемов работ по продлению назначенных показателей срока службы.

Постановка задачи

Приведенные доводы свидетельствуют об актуальности задачи, которая заключается в разработке научно-методического аппарата, а именно, методики обоснования возможности и условий продления назначенных показателей срока службы АС НС ИКК.

В основу разрабатываемой методики положены следующие основные методологические принципы:

– продление назначенных показателей срока службы АС НС ИКК должно осуществляться в пределах прогнозируемого остаточного срока службы;

– прогнозирование остаточного срока службы АС НС ИКК должно осуществляться с учетом изменения во времени надежности элементной базы и возможностей восстановления работоспособности оборудования при отказах;

– приемлемая достоверность прогнозных оценок остаточного срока службы АС НС ИКК в условиях ограниченного объема статистических данных должна

обеспечиваться обоснованным выбором размерности прогнозной модели и использованием дополнительной экспертной информации о надежности элементной базы и возможностях восстановления работоспособности оборудования при отказах;

– в случае несоответствия планируемого срока продления фактическому остаточному сроку службы АС НС ИКК должен определяться перечень дополнительных мероприятий, позволяющих увеличить фактический остаточный срок службы АС НС ИКК до требуемых значений с минимальным расходом материальных и финансовых затрат.

Решение задачи

Согласно разработанной методики на первом этапе производится сбор общих сведений об АС НС ИКК в которые входят назначение, состав, основные тактико-технические характеристики, устройство, принцип функционирования и сведения о составных частях (СЧ) АС НС ИКК. Также осуществляется анализ технической документации с целью установления характера и конкретных условий работы АС НС ИКК, технических параметров, норм и критериев оценки качества элементов, наиболее вероятных отказов и повреждений. Анализу подлежат нормативно-техническая, конструкторская и эксплуатационная документация. Данные о результатах эксплуатации для каждого из элементов СЧ АС НС ИКК, а также источники информации заносятся в сводную таблицу.

Вторым этапом проводится обследование технического состояния АС НС ИКК. Для проведения работ по контролю параметров технического состояния АС НС ИКК используются штатные средства неразрушающего контроля. Данные

средства неразрушающего контроля хранятся, аттестуются, эксплуатируются, поверяются в соответствии со всеми требованиями руководящих документов по метрологическому обеспечению.

В ходе обследования при проведении измерения параметров технического состояния часть данных получается путем проведения исследований с использованием приборов неразрушающего контроля АС НС ИКК. Перечень параметров, контролируемых приборами неразрушающего контроля, выбирается на основе анализа технической документации АС НС ИКК. Для проведения обследования АС НС ИКК приборы неразрушающего контроля должны находиться в исправном состоянии и иметь соответствующую метрологическую поверку установленным порядком.

Анализ эксплуатационной документации проводится с целью первоначальной оценки технического состояния АС НС ИКК по формальным признакам, уточнения программы обследования, выбора элементов для углубленного обследования, а также сбора исходных данных для настройки приборов неразрушающего контроля и проведения расчетов надежности.

Сбор статистической и экспертной информации о техническом состоянии элементов СЧ АС НС ИКК проводится с целью накопления исходных данных для оценивания технического состояния отдельных элементов с использованием статистических методов расчета параметров надежности.

В ходе обследование элементов СЧ АС НС ИКК при проведении визуального осмотра, измерительного контроля в ходе визуального осмотра, обследования методами неразрушающего контроля места измерения параметров технического

состояния определяются в соответствии со схемой контроля, пример которой приведен на рис. 2.

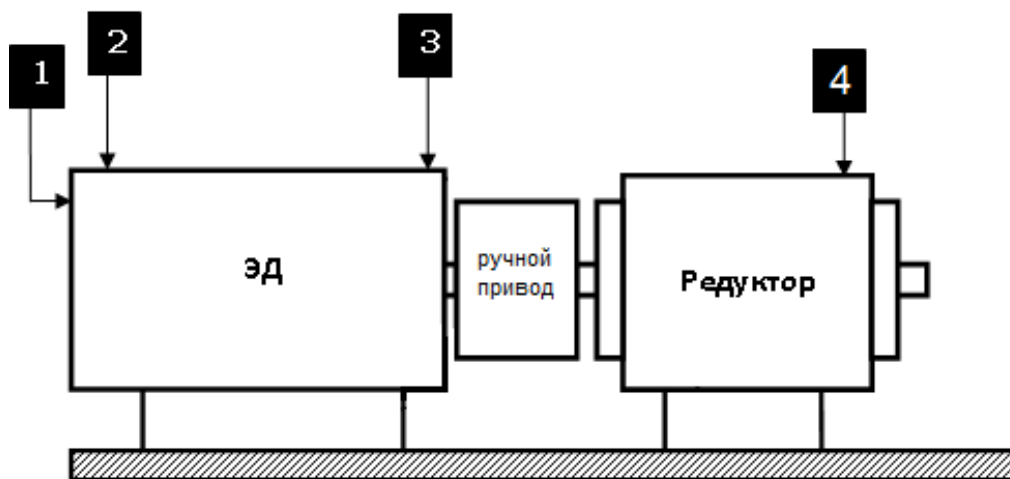


Рисунок 2. – Схема расположения контрольных точек на электродвигателе приводов наведения азимута и угла места ОПУ АС при проведении контроля по параметру «виброскорость, виброперемещение»

Визуальный контроль проводится путем визуального осмотра без применения приборов неразрушающего контроля для выявления внешних проявлений дефектов оборудования и оценки их параметров средствами измерения. Осмотр проводится в соответствии со схемой визуального контроля и соблюдением методических рекомендаций по визуальному осмотру АС НС ИКК.

Обработка и анализ результатов обследования АС НС ИКК выполняются в соответствии с применяемыми методами и методиками, изложенными в нормативной документации.

На третьем этапе по собранным исходным данным производится построение

структурно-функциональной схемы и «дерева» достижения предельного состояния АС НС ИКК, которые изображены рис. 3, 4 и 5.

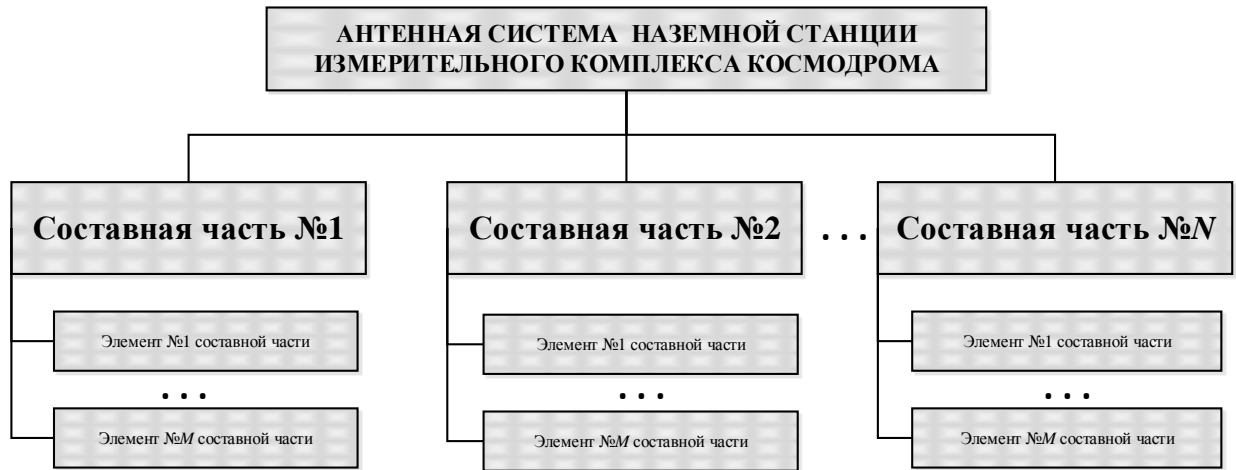


Рисунок 3. – Структурно-функциональная схема АС НС ИКК

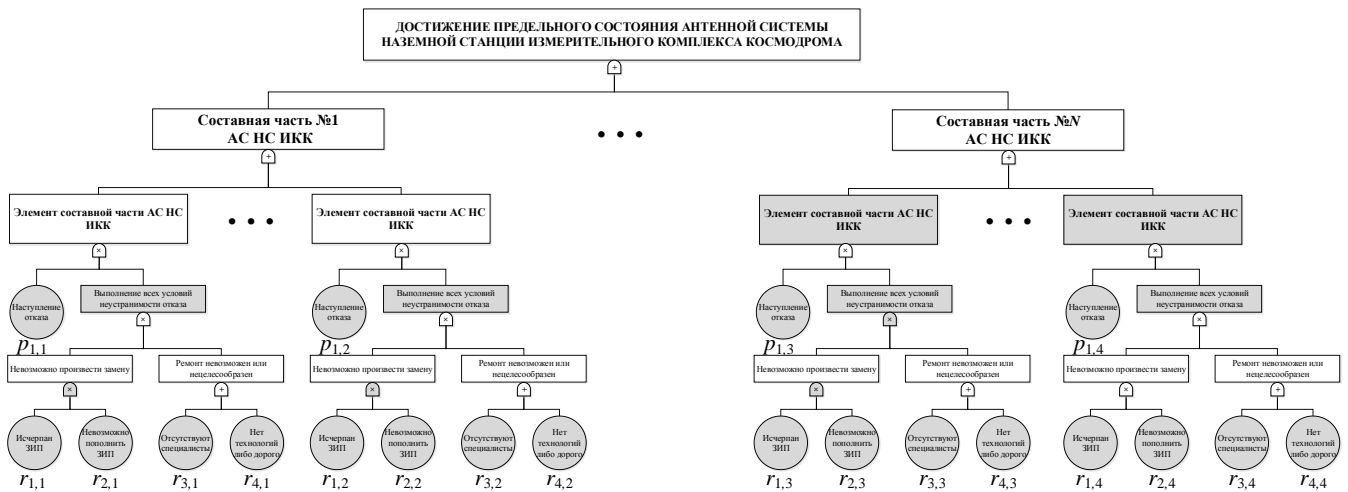


Рисунок 4. – Дерево достижения предельного состояния АС НС ИКК

с вероятностными функциями элементов

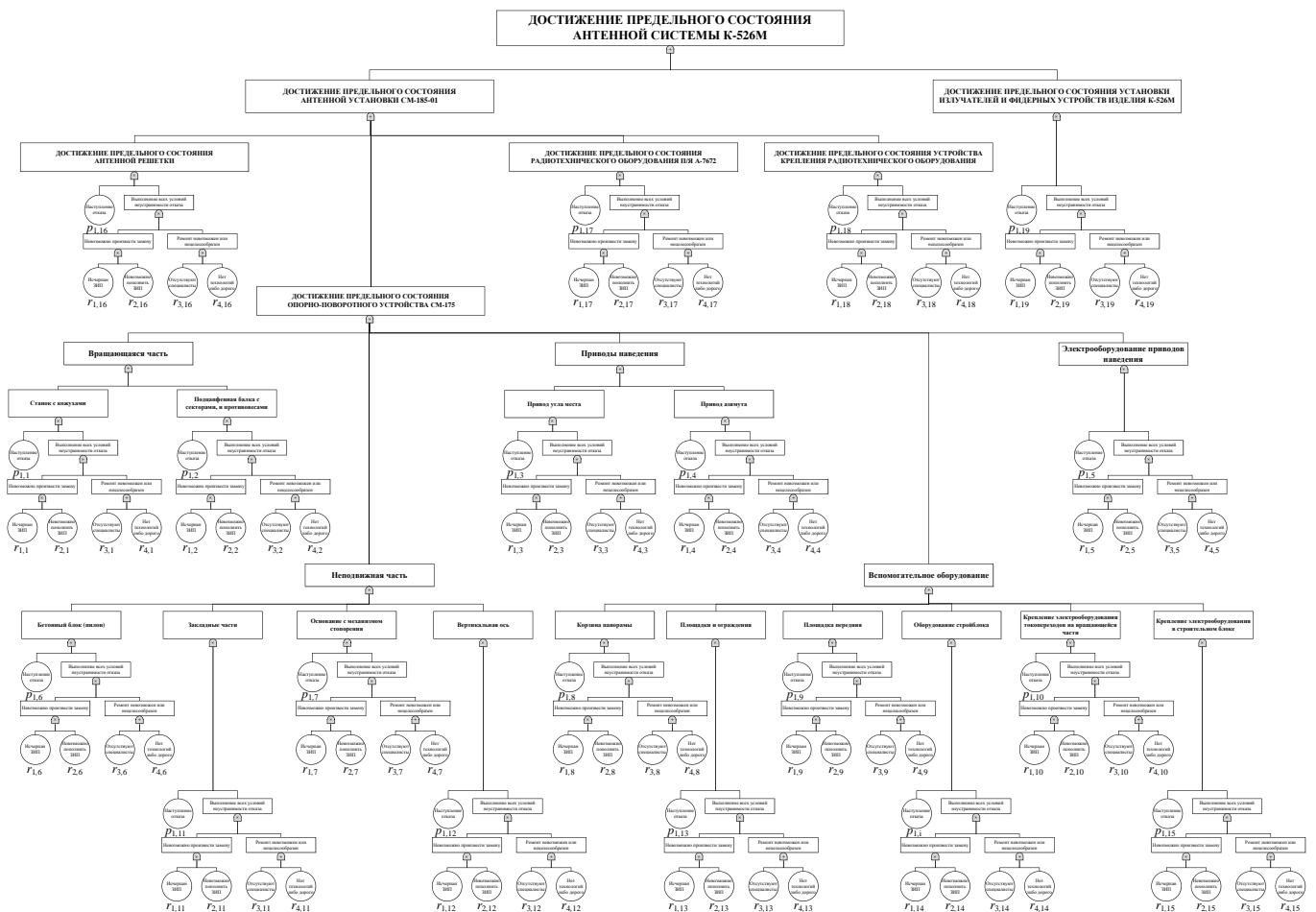


Рисунок 5. – Пример дерева достижения предельного состояния для АС К-526М с вероятностными функциями элементов

Предельное состояние системы – это состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Дерево предельного состояния – представляет собой графическое отображение причинно-следственных связей между наступлением предельного состояния объекта с отказами (переходами в предельное состояние его элементов) и другими событиями. В качестве других событий могут, в частности, рассматриваться события, заключающиеся в снижении возможностей системы

восстановления технического ресурса (исчерпанием ЗИП, невозможностью восполнения ЗИП, отсутствием условий для проведения ремонта и т.п.).

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

На четвертом этапе, согласно методики, описываются данные с критериями и признаками достижения предельного состояния АС НС ИКК и их СЧ, которые заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Критерии и признаки наступления предельного состояния АС НС ИКК (для примера приведено на АС К-526М)

№ п/п	Наименование системы (СЧ системы или ее элемента)	Критерий ПС (отказа)	Признак предельного состояния
1.	АС К-526М	Неустранимый отказ АС К-526М	Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей: – АУ СМ-185-01; – установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М.

№ п/п	Наименование системы (СЧ системы или ее элемента)	Критерий ПС (отказа)	Признак предельного состояния
2.	Установка излучателей и фидерных устройств изделия К-526М	Неустраняемый отказ установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М	<p>Одновременное наступление следующих событий:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отказ установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М; – выполнение всех условий неустраняемости отказа установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М.
3.	Отказ установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	<p>Эффективная площадь антенны – не менее 90м^2</p> <p>Волновое сопротивление выходов антенны – $0,75\text{ Ом}$;</p> <p>Коэффициент эллиптичности – не ниже $0,7$;</p> <p>Ширина диаграммы направленности (по уровню половинной мощности) основной антенны:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $2,8^\circ - 2,5^\circ$ в азимутальной плоскости; – $3,8^\circ - 3,2^\circ$ в угловой плоскости. <p>Ширина диаграммы направленности (по уровню половинной мощности) дополнительной антенны:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $14,9^\circ - 17,1^\circ$ в азимутальной плоскости; – $9,8^\circ - 11,1^\circ$ в угловой плоскости. <p>Коэффициент стоячей волны на выходах антенны – не выше $1,4$;</p> <p>Коэффициент стоячей волны излучателя – не выше $1,4$;</p> <p>Коэффициент стоячей волны делителя мощности $1:24$ – не выше $1,25$;</p> <p>Коэффициент стоячей волны делителя мощности $1:6$ – не выше $1,25$;</p>
4.	Установка излучателей и фидерных устройств изделия К-526М	Выполнение всех условий неустраняемости отказа;	<p>Одновременное наступление следующих событий:</p> <ul style="list-style-type: none"> – невозможность произвести замену установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М; – невозможность или нецелесообразность проведения ремонта установки излучателей и фидерных устройств изделия К-526М
5.	Установка излучателей и фидерных устройств изделия К-526М	Невозможность произвести замену	<p>Одновременное наступление следующих событий:</p> <ul style="list-style-type: none"> – исчерпание ЗИП; – невозможность пополнения ЗИП.

№ п/п	Наименование системы (СЧ системы или ее элемента)	Критерий ПС (отказа)	Признак предельного состояния
6.	Установка излучателей и фидерных устройств изделия К-526М	Невозможность или не целесообразность проведения ремонта	Наступление хотя бы одного из следующих событий: – отсутствие специалистов; – отсутствие технологий или дороговизна.
7.	АУ СМ-185-01	Неустранимый отказ АУ СМ-185-01	Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей: – антенной решетки; – ОПУ СМ-175; – радиотехнического оборудования п/я А-7672 – устройства крепления радиотехнического оборудования
8.	Отказ антенной решетки	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Согласование антенных секций антенны с узкой диаграммой направленности (УДН) и секций антенны с широкой диаграммой направленности с системой питания должно быть не хуже 0,72 (КСВ < 1,41) в диапазоне рабочих частот. Допустимая погрешность измерений – 7%.
9.	Отказ радиотехнического оборудования п/я А-7672	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Рабочий диапазон частот должен быть: f1 – 8 МГц ... f2 + 7 МГц
10.	Отказ устройства крепления радиотехнического оборудования	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	– наличие коррозии более 40% площади поверхности, значительных механических повреждений, деформации, прогибов и трещин металлоконструкций – обрыв головок, вывинчивание, возможность вращения гаечным ключом, ослабление затяжки менее момента, указанного в документации, болтов крепления силовых элементов – нарушение целостности и наличие трещин сварного шва – нарушение геометрических параметров конструктивных элементов (сечения, высота, длина)

№ п/п	Наименование системы (СЧ системы или ее элемента)	Критерий ПС (отказа)	Признак предельного состояния
11.	ОПУ СМ-175	Неустранимый отказ ОПУ СМ-175	<p>Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей:</p> <ul style="list-style-type: none"> – неподвижной части; – вращающейся части; – приводов наведения; – вспомогательного оборудования; – электрооборудования приводов наведения.
12.	Неподвижная часть ОПУ СМ-175	Неустранимый отказ неподвижной части	<p>Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей:</p> <ul style="list-style-type: none"> – бетонного блока (пилона); – закладных частей; – основания с механизмом стопорения; – вертикальной оси.
13.	Вращающаяся часть ОПУ СМ-175	Неустранимый отказ вращающейся части	<p>Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей:</p> <ul style="list-style-type: none"> – станка с кожухами; – подцапфетной балки с секторами и противовесами.
14.	Приводы наведения ОПУ СМ-175	Неустранимый отказ приводов наведения	<p>Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей:</p> <ul style="list-style-type: none"> – привода угла места; – привода угла азимута.
15.	Вспомогательное оборудование ОПУ СМ-175	Неустранимый отказ вспомогательного оборудования	<p>Переход в состояние неустранимого отказа хотя бы одного из следующих составных частей:</p> <ul style="list-style-type: none"> – корзины панорамы; – площадки и ограждения; – площадки передней; – оборудования стройблока; – крепления электрооборудования токопереходов во вращающейся части; – крепления электрооборудования в строительном блоке

№ п/п	Наименование системы (СЧ системы или ее элемента)	Критерий ПС (отказа)	Признак предельного состояния
16.	Отказ электрооборудования приводов наведения ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	<p>При значениях виброскорости до 4,5 мм/с – машина пригодна для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков.</p> <p>При значениях виброскорости от 4,5 до 7,1 мм/с – машина непригодна для длительной непрерывной эксплуатации.</p> <p>При значениях виброскорости свыше 7,1 мм/с и виброперемещения свыше 30 мкм – вибрации рассматриваются как достаточно серьезные, для того, чтобы вызвать повреждение машины.</p>
17.	Отказ бетонного блока (пилона) неподвижной части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	<p>Наличие дефектов и повреждений строительных конструкций, снижающих их несущие и эксплуатационные характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> – деформации и прогибы; – нарушение геометрических размеров; – механические и иные повреждения; – трещины, отслоения защитного слоя бетона; – коррозия арматуры, нарушение сцепления арматуры с бетоном; – коррозия металлических несущих элементов, закладных изделий.
18.	Отказ закладных элементов неподвижной части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
19.	Отказ основания с механизмом стопорения неподвижной части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
20.	Отказ вертикальной оси неподвижной части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
21.	Отказ станка с кожухами вращающейся части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.

№ п/п	Наименование системы (СЧ системы или ее элемента)	Критерий ПС (отказа)	Признак предельного состояния
22.	Отказ подцапфетной балки с секторами и противовесами вращающейся части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
23.	Отказ привода угла места ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Не обеспечивается угловая ошибка наведения в пределах требований ТУ (не более 30 мин.)
24.	Отказ привода угла азимута ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Не обеспечивается угловая ошибка наведения в пределах требований ТУ (не более 30 мин.)
25.	Отказ корзины панорамы ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
26.	Отказ площадки и ограждения ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
27.	Отказ площадки передней ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
28.	Отказ оборудования стройблока ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 17 таблицы 1.
29.	Отказ крепления электрооборудования токопереходов во вращающейся части ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.
30.	Отказ крепления электрооборудования в строительном блоке ОПУ СМ-175	Выход технических параметров и характеристик за пределы границ поля допуска	Смотри пункт 10 таблицы 1.

Критериями предельного состояния объекта являются установленные в стандартах и конструкторских документах признаки состояния объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация невозможна, нецелесообразна или опасна. В основу формирования критериев предельного состояния АС НС ИКК целесообразно положить признаки, характеризующие невозможность восстановления работоспособного состояния.

Пятый этап посвящен построению математической модели достижения предельного состояния АС НС ИКК и соответствующей ей вероятностной функции, полученной на основе формализации «дерева» достижения предельного состояния

Критерием достижения предельного состояния (ПС) АС НС ИКК является выполнение условия:

$$G \cdot P_{\text{НДПС}}^{\text{АС}} \leq \frac{\gamma}{100\%}, \quad (1)$$

где $P_{\text{НДПС}}^{\text{АС}}$ вероятность недостижения предельного состояния (ВНПС) АС НС ИКК;

γ – условный приемлемый уровень вероятности недостижения предельного состояния (гамма), принимается для АС НС ИКК на основе таблицы 2.

Таблица 2 – Рекомендации для выбора значения параметра γ (в процентах)

Характеристика объекта и условий эксплуатации	Значение параметра γ (%)
Общепромышленный объект с невысокой ценой отказа, функционирующий в стабильных условиях	90
Общепромышленный объект с высокой ценой отказа, функционирующий в стабильных условиях	95
Уникальный объект с высокой ценой отказа, функционирующий в нестабильных (изменяющихся) условиях эксплуатации	99

Для более подробного представления математической модели достижения

предельного состояния системой необходимо получить логическую функцию достижения предельного состояния системы, которая может быть получена путем формализации «дерева» достижения предельного состояния:

$$Y_{AC} = Z_{CЧ1} \vee Z_{CЧ2} \vee \dots \vee Z_{CЧN}, \quad (2)$$

где Y – логическая функция первого уровня;

Z – логическая функция второго уровня;

Y_{AC} – достижение предельного состояния АС НС ИКК;

$Z_{CЧ}$ – достижение предельного состояния СЧ АС НС ИКК;

Тогда вероятностная функция недостижения предельного состояния АС НС ИКК имеет вид:

$$P_{НДПС}^{АС}(t) = \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - [1 - p_{1i}(t)] \times [1 - r_{1i}(t)] \times \right. \\ \left. \times [1 - r_{2i}(t)] \times [1 - r_{3i}(t)] \times r_{4i}(t) \right\} \quad (3)$$

где $p_{1i}(t)$ – вероятностей безотказной работы элементов СЧ АС НС ИКК;

$r_{1i}(t)$ – вероятностей неисчерпания ЗИП элементов СЧ АС НС ИКК;

$r_{2i}(t)$ – вероятностей пополнения ЗИП элементов СЧ АС НС ИКК;

$r_{3i}(t)$ – вероятностей наличия специалистов по ремонту элементов СЧ АС НС ИКК;

$r_{4i}(t)$ – вероятностей наличия доступных технологий ремонта элементов СЧ АС НС ИКК;

m – количество элементов СЧ АС НС ИКК.

Значения $p_{1i}(t)$ – вероятностей безотказной работы элементов СЧ АС НС ИКК рассчитаны на основе выражения:

$$p_{1i}(t) = e^{-\lambda_i \times t}, \quad (4)$$

где λ_i – значение интенсивности отказа i -го элемента СЧ АС НС ИКК, рассчитываемое по формуле:

$$\lambda_i = \frac{1}{\bar{T}_i}, \quad (5)$$

где \bar{T}_i – средняя наработка на отказ i -го элемента СЧ АС НС ИКК. Оценки параметров λ_i и \bar{T}_i могут быть либо взяты из справочников по надежности, либо получены методом экспертного оценивания, либо рассчитаны по результатам мониторинга технического состояния.

Значения $\eta_i(t)$ – вероятностей неисчерпания ЗИП элемента СЧ АС НС ИКК рассчитываются следующим образом. В результате мониторинга определяются значения текущих запасов для каждого элемента СЧ в виде числа запасных элементов M_i .

ЗИП из M_i элементов не будет исчерпан, если число отказов $N(t)$ за время $(0, t)$ не превысит $M_i - 1$, т.е.:

$$\eta_i(t) = P\{N(t) \leq M_i - 1\} = \sum_{m=1}^{M_i-1} P\{N(t) = m\}, \quad (6)$$

где вероятность $P\{N(t) = m\}$ рассчитывается в предположении о том, что поток отказов (восстановлений) – простейший, по формуле:

$$P\{N(t) = m\} = \frac{(ht)^m}{m!} \times e^{-ht}, \quad (7)$$

где $h = \frac{N(t)}{t}$ – параметр потока отказов, $N(t)$ – число отказов за интервал времени $(0, t)$. Значение $N(t)$ может быть получено в ходе мониторинга технического состояния. Тогда можно записать:

$$r_{1i}(t) = \sum_{m=1}^{M_i-1} \frac{(ht)^m}{m!} \times e^{-ht}. \quad (8)$$

Значения вероятностей $r_{2i}(t)$ пополнения ЗИП элемента СЧ АС НС ИКК для фиксированного временного интервала $(0, t)$ предлагается оценивать экспертно с помощью лингвистической шкалы, представленной в таблице 3.

Таблица 3 – Шкала для оценивания вероятности пополнения ЗИП

Градации лингвистической оценки фактических возможностей пополнения ЗИП	Значение вероятности $r_{2i}(t)$
Пополнение ЗИП невозможно (комплектующие сняты с производства, возобновление производства невозможно по техническим, либо экономическим критериям)	0
Пополнение ЗИП возможно, но с существенными затратами финансовых, материальных и временных ресурсов	0,5
Пополнение ЗИП возможно (комплектующие производятся промышленностью, либо имеется достаточный их запас на складах, затраты на поставку ЗИП приемлемы с учетом экономических возможностей эксплуатирующей организации)	1

Значения вероятностей $r_{3i}(t)$ наличия специалистов по ремонту элементов СЧ АС НС ИКК для фиксированного временного интервала $(0, t)$ предлагается оценивать экспертно с помощью лингвистической шкалы, представленной в таблице 4.

Таблица 4 – Шкала для оценивания вероятности наличия специалистов по ремонту элементов СЧ АС НС ИКК

Градации лингвистической оценки вероятности наличия специалистов по ремонту элементов СЧ АС НС ИКК	Значение вероятности $r_{3i}(t)$
Специалистов нет (в наличии нет подготовленных специалистов, подготовка и переподготовка не производится, восстановление процесса подготовки невозможно по методическим, экономическими другим критериям)	0
Привлечение специалистов возможно, но с существенными затратами финансовых, материальных и временных ресурсов	0,5
Специалисты по ремонту в наличии, либо существует сервисное обслуживание	1

Значения вероятностей $r_{4i}(t)$ наличия доступных технологий ремонта элементов СЧ АС НС ИКК для фиксированного временного интервала $(0,t)$ предлагается оценивать экспертно с помощью лингвистической шкалы, представленной в таблице 5.

Таблица 5 – Шкала для оценивания вероятностей наличия доступных технологий ремонта элементов СЧ АС НС ИКК

Градации лингвистической оценки фактических возможностей выполнения ремонтных работ	Значение вероятности $r_{4i}(t)$
Ремонт невозможен (технология ремонта утрачена, восстановление технологии ремонта невозможно по техническим, либо экономическим критериям)	0
Ремонт возможен, но с существенными затратами финансовых, материальных и временных ресурсов	0,5
Ремонт возможен (технология ремонта имеется, затраты на ремонт приемлемы с учетом экономических возможностей эксплуатирующей организации)	1

Обобщенные данные для расчета вероятности недостижения предельного состояния АС НС ИКК заносятся в таблицу 6.

Таблица 6 – Пример заполнения обобщенных данных для расчета ВНПС АС НС ИКК

	$p_{1i}(t)$	$r_{1i}(t)$	$r_{2i}(t)$	$r_{3i}(t)$	$r_{4i}(t)$
$i=1$	10^{-3}	1	1	0,5	0,5
$i=2$	10^{-5}	1	0,5	1	0,5
...
$i=m$	10^{-4}	0	0,5	1	1

Значения функции ВНПС АС НС ИКК от времени, с использованием исходных данных взятых из таблицы 6, рассчитываются по формуле (3). Совокупность полученных значений функции образует график приведенный на рис. 6.

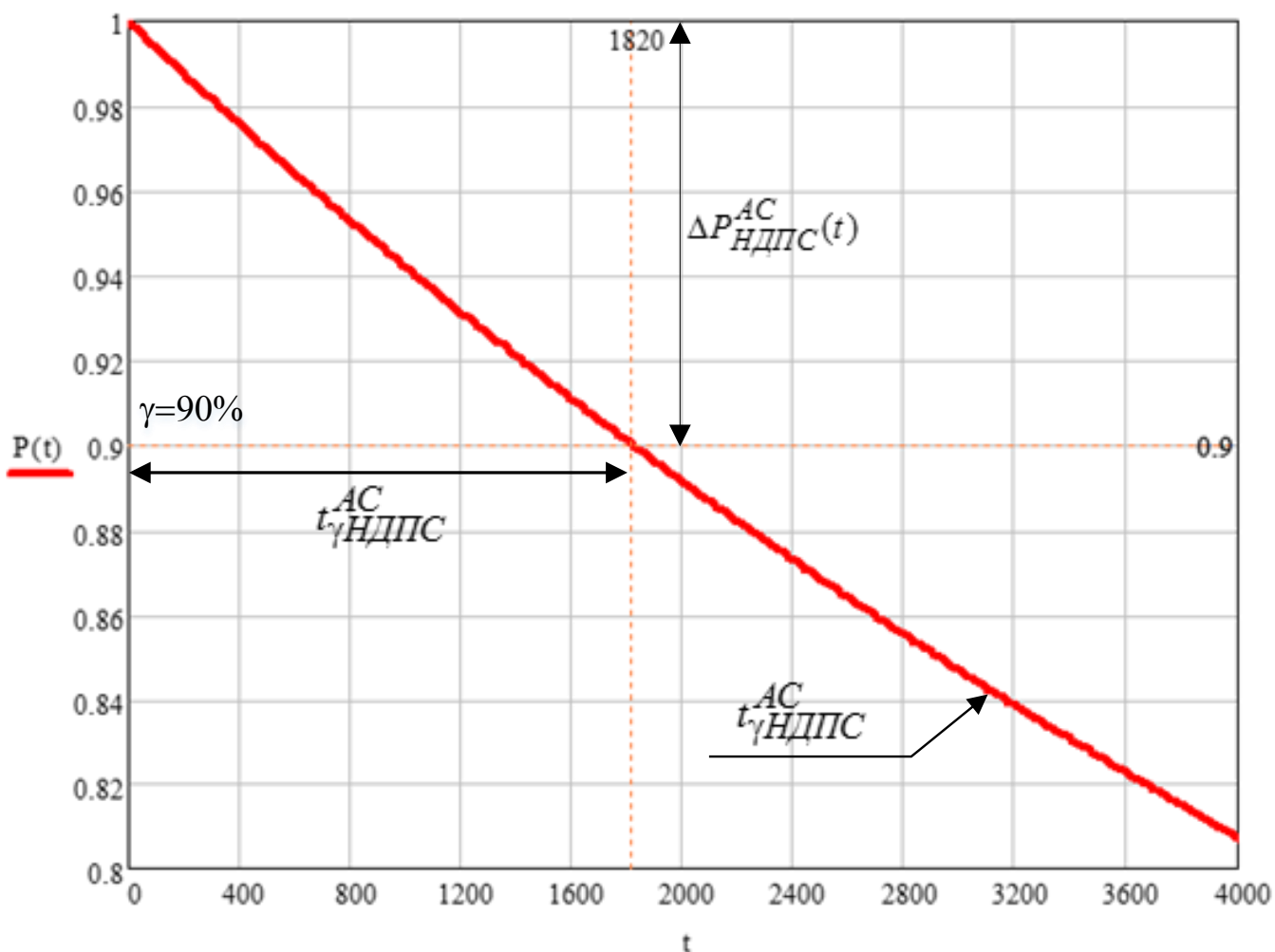


Рисунок 6. – Пример графика ВНПС для AC НС ИКК при выбранном уровне $\gamma=90\%$

При выбранном уровне γ , например равным 90%, находим величину остаточного гамма-процентного ресурса $t_{\gamma}^{АС}$ для AC НС ИКК. Вычислив среднегодовую суммарную наработку AC НС ИКК, рассчитываем значение остаточного гамма-процентного срока службы.

Порядок прогнозирования остаточного ресурса (срока службы) AC НС ИКК может быть представлен в виде алгоритма прогнозирования показателя долговечности, который изображен на рис. 7.

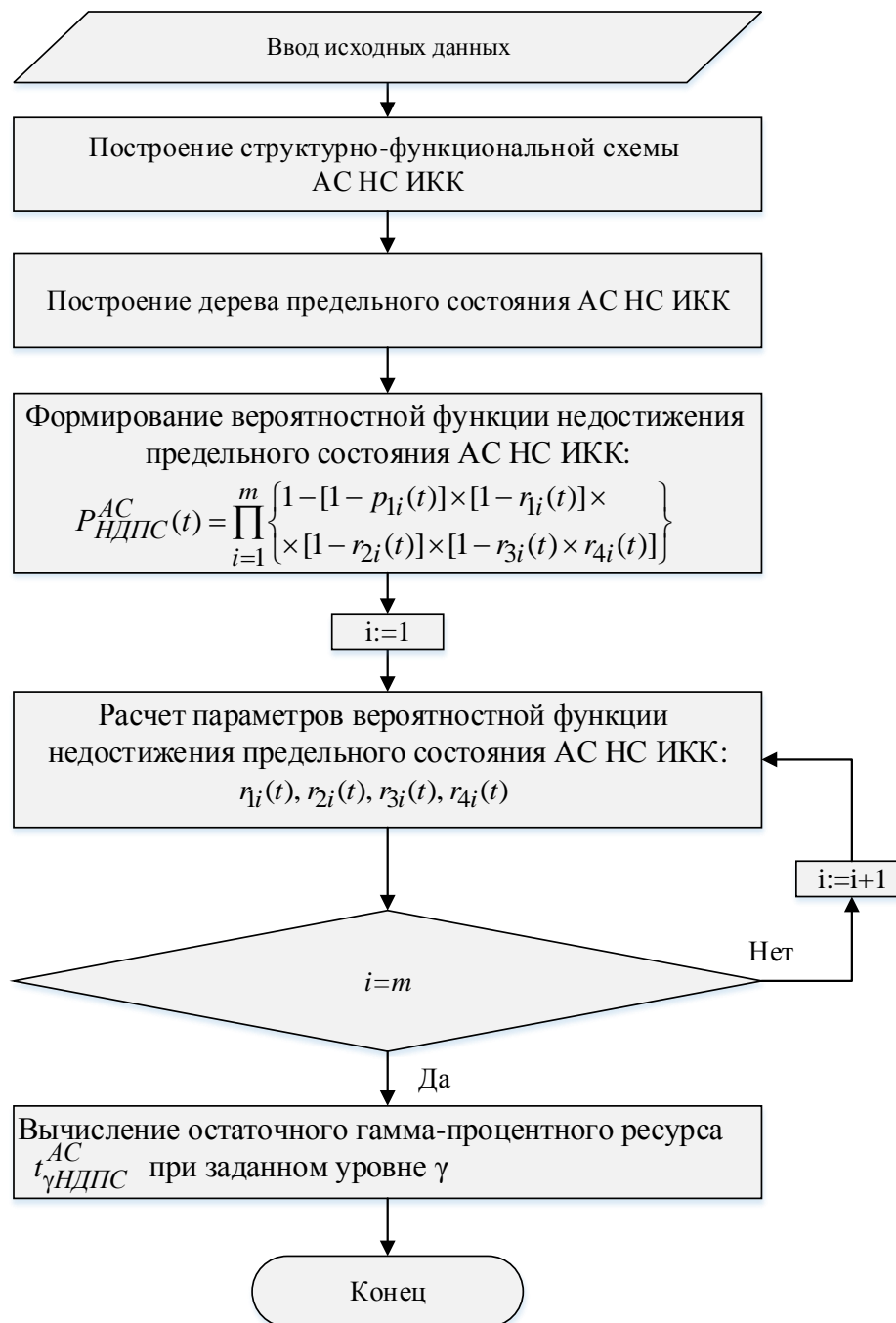


Рисунок 7. – Алгоритм прогнозирования показателя долговечности АС НС ИКК

На шестом этапе осуществляется оценивание текущего технического состояния АС НС ИКК. Порядок оценивания разрабатывается в соответствии с нормативной документацией.

Оценка текущего технического состояния АС НС ИКК осуществляется с учетом следующих факторов, допущений и ограничений:

1. Текущее техническое состояние АС НС ИКК определяется соответствием параметров технического состояния их оборудования техническим условиям и требованиям, определенным конструкторской и эксплуатационной документацией, в соответствии с разработанными картами технического освидетельствования.

2. Текущее техническое состояние АС НС ИКК зависит от наличия резервов (прочностного, ЗИП и других) параметров его технического состояния.

3. Техническое состояние АС НС ИКК может оцениваться как:

- работоспособное с резервом;
- работоспособное без резерва;
- неработоспособное;
- предельное.

Исходные данные для оценивания текущего технического состояния АС НС ИКК по каждому элементу – это перечень параметров, определяющих его техническое состояние, их текущие значения и нормы (области допустимых значений).

Порядок оценивания текущего технического состояния АС НС ИКК состоит из следующих процедур:

- сбор исходных данных для оценки текущего технического состояния АС НС ИКК;
- оценка текущего технического состояния АС НС ИКК;
- оформление результатов оценки текущего технического состояния АС НС ИКК.

На заключительном этапе производится определение перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактические показатели остаточного ресурса (срока службы) АС НС ИКК не ниже требуемого (назначаемого при продлении).

Порядок определения предназначен для определения рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс АС НС ИКК не ниже требуемого. Порядок определения разрабатывается в соответствии с руководящими документами.

Определение рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс АС НС ИКК не ниже требуемого осуществляется с учетом следующих факторов, допущений и ограничений. Рациональность мероприятия определяется его действенностью и затратами на реализацию.

Перечень элементов АС НС ИКК, требующих выполнения ремонтно-профилактических мероприятий, определяется в ходе оценки текущего технического состояния элементов и прогнозирования их остаточного технического ресурса (срока службы).

Данные о влиянии элементов АС НС ИКК, требующих выполнения ремонтно-профилактических мероприятий, на техническое состояние системы по каждому элементу системы – это значения коэффициентов влияния элементов на технический ресурс (срок службы) системы согласно «дерева» достижения предельного состояния.

Данные о затратах, необходимых для реализации возможных ремонтно-профилактических мероприятий по каждому элементу системы – это оценки затрат на замену (ремонт) элементов согласно «дерева» достижения предельного состояния.

Порядок определения рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс системы не ниже требуемого состоит из следующих процедур:

- сбор исходных данных для определения рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс системы не ниже требуемого;

- определение рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс системы не ниже требуемого;

- оформление результатов определения рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс системы не ниже требуемого.

По результатам определения рационального перечня мероприятий, позволяющих обеспечить фактический ресурс системы не ниже требуемого выпускается заключение о техническом состоянии АС НС ИКК, содержащее перечень проверенных параметров (узлов), предложения о продлении назначенного срока (ресурса), расчет ориентировочной стоимости ремонтных работ и план мероприятий по обеспечению эксплуатации системы на продлеваемый период.

Заключение

Основные результаты исследований доведены до конкретных инженерных методик для их использования на практике.

Проведена практическая апробация методики обоснования возможностей и условий продления назначенных показателей срока службы АС НС ИКК с учетом ограниченного объема исходных данных о надежности элементной базы и

возможностях восстановления отказов оборудования при обосновании решений по продлению назначенных показателей срока службы АС НС ИКК.

Применение разрабатываемого научно-методического аппарата позволит повысить обоснованность решений по управлению эксплуатацией АС НС ИКК по сравнению с методиками, обеспечить их надежное и безопасное функционирование при экономии материальных и финансовых средств в среднем на 20-25%.

Библиографический список

1. Судаков Р.С., Тескин О.Н. Надёжность и эффективность в технике. - М.: Машиностроение, 1986. Т. 6. - 376 с.
2. Методические указания. Надёжность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Правила установления в стандартах и конструкторских документах. РД 50-202-80. - М.: Изд. – во стандартов, 1980. URL: <http://document.ua/docs/tdoc8538.php>
3. Миронов А.Н., Пальгунов В.Ю., Ковальский А.А. Математическая модель достижения предельного состояния антенных систем наземных станций измерительного комплекса космодрома «Плесецк» // Известия Института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С. 31 - 36.
4. Цветков К.Ю., Ковальский А.А., Пальгунов В.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса антенных систем наземных станций измерительных комплексов // Известия института инженерной физики. 2016. Т. 3. № 41. С. 17 - 25.
5. Шестопалова О.Л. Прогнозирование моральной долговечности распределенных информационных систем с учетом прогрессирующих ограничений на возможности

восстановления ресурса элементной базы // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/113-11078>.

6. Шестопалова О.Л. Основы построения систем сбора и обработки информации о техническом состоянии космических средств. - Набережные Челны: Изд-во Камской инженерно-экономической академии, 2007. – 91 с.

7. Дорохов А.Н., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Определение потребности в модернизации средств технического обеспечения распределенной системы сбора и обработки информации // Информация и космос. 2014. № 1. С. 9 – 12.

8. Сизяков Н.П., Шестопалова О.Л. Прогнозирование соответствия характеристик космических средств предъявляемым требованиям на основе использования нечеткой регрессионной модели // Информация и космос. 2010. № 1. С. 133 - 135.

9. Ломакин М.И., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 8 - 13.

10. Заковряшин А.И., Кошелькова Л.В. Оценка максимально допустимого времени применения сложного объекта по назначению // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=73384>

11. Заковряшин А.И. Метод количественных оценок технических состояний сложных систем // Труды МАИ. 2014. № 72. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47270>

12. Закиров Р.Г. Прогнозирование технического состояния бортового радиоэлектронного оборудования // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67515>

13. РД 50-202-80. Методические указания. Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Правила установления в стандартах и конструкторских документах. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 10 с.
14. Методические рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния несущих элементов зданий и сооружений. - СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. – 110 с.
15. Митчелл Р. Моральный износ и как с ним бороться // Computer world Россия. 2008. № 32. URL: <http://www.osp.ru/cw/2008/32/5462756>
16. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
17. Миронов А.Н., Антропов О.В., Баранов Л.Т. и др. Основы эксплуатации объектов космической инфраструктуры: Монография под ред. А.Н. Кузнецова. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003.- Т.2 в 3-х книгах. Кн.3.- 404 с.
18. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управления запасами. - СПб: Питер, 2001. – 384 с.
19. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.
20. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 256 с.
21. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы, срока хранения военной техники. ГОСТ РВ 15.702-94 – М.: Госстандарт России, 1995. URL: <https://www.twirpx.com/file/378241>

22. Червоный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. - М.: Машиностроение, 1976. - 288 с.
23. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
24. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. – М.: Советское радио, 1975. – 400 с.
25. Плетнёв И.Л., Рембеза А.И., Соколов Ю.А. Эффективность и надёжность сложных систем и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
26. Martz H.F. Pooling life-test data by means of the empirical Raues Method // IEEE Transaction on Reliability, 1975, vol. 24, pp. 27 - 30.
27. Robbins H. An empirical Bayes approach to statistical decision, problems // Annals of Mathematical Statistics, 1964, no. 35, pp. 1 - 20.