

Прогнозирование показателей долговечности наземных комплексов с учетом разнотипности критериев предельного состояния его элементов

Forecasting of ground complex lifetime indexes with account of diversity of types of their elements limit state

Ключевые слова: долговечность – lifetime; структурная модель – structural model; предельное состояние – limit state.

В статье описан комплексный подход к прогнозированию показателей долговечности наземных комплексов (НК), основанный на построении структурных моделей достижения предельного состояния, включающих события, связанные как с отказами элементов оборудования НК, так и с динамикой возможностей восстановления ресурса. При этом возможен учет различных типов критериев перехода в предельное состояние отдельных составных частей НК. Данна характеристика основных этапов прогнозирования показателей долговечности с использованием структурных моделей достижения предельного состояния наземного комплекса.

Described in the article is an integrated approach to forecasting the ground complex (GC) lifetime indexes based on creation of structural models of limit state reaching, including events connected with both GC equipment elements failures and dynamics of possible resource recovery. At that, it is possible to consider different types of criteria of individual GC component parts transition to limit state. A characteristic of the main stages of forecasting the lifetime indexes with the use of structural models of reaching the ground complex limit state is also given therein.

До недавнего времени статистические и физико-статистические методы являлись основным инструментарием в арсенале методов решения проблемы прогнозирования предельных сроков эксплуатации отдельных средств и наземных комплексов в целом. Эта ситуация перестала удовлетворять требованиям практики с начала 90-х годов, когда произошли существенные изменения в государственной технической полити-

БЕССОНОВ / BESSONOV P.

Павел Евгеньевич

(bessonov.pe@szte.ru)

старший научный сотрудник,
филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «ЦЭНКИ – Северо-Запад»,
Санкт-Петербург

ПИВОВАРОВ / PIVOVAROV O.

Олег Григорьевич

(command@usst3.spb.ru)

начальник ФГУП «ГУССТ № 3 при Спецстрое России»,
Санкт-Петербург

тике, обусловленные снижением возможностей бюджетного финансирования планового восстановления ресурса сложных высокоответственных уникальных систем оборонного и народно-хозяйственного значения. К таким системам относятся стартовые комплексы ракет космического назначения, боевые ракетные комплексы, космические аппараты с длительными сроками функционирования, орбитальные космические станции, атомные электростанции и другие объекты. Ранее подобные системы эксплуатировались до израсходования назначенного ресурса (срока службы), после чего выводились на капитальный ремонт либо заменялись на новые. Принятые правила назначения ресурса (срока службы) подобных систем при социалистическом способе производства ориентировались на установленную величину интервала времени обновления основных производственных фондов, который составлял в среднем 7–15 лет [1]. Данная величина назначенного ресурса определяла средний срок морального старения, после истечения которого объекты должны были модернизироваться. Однако новизна технических решений в большинстве объектов подобного класса, а также конструкторский и производственный запасы надежности часто, а для объектов ракетно-космической отрасли (за исключением космических аппаратов) – как правило, превышали директивный уровень

назначенного ресурса (срока службы). В настоящее время это подтверждается практикой эксплуатации многих подобных объектов за пределами первоначально назначенного ресурса. В частности, анализ эксплуатации пусковых установок стартового комплекса ракет космического назначения «Протон» показывает, что назначенный ресурс по числу пусков превышается по некоторым из них в 2–3 раза. Однако продление назначенного ресурса осуществлялось, в основном, на основе экспертного анализа опыта эксплуатации, без глубокого научного исследования возможностей дальнейшей эксплуатации данных систем. В настоящее время необходимость совершенствования подходов к оцениванию и прогнозированию остаточного ресурса (срока службы) подобных систем актуальна, как никогда ранее. Следует отметить, что подобная ситуация сложилась не только в России, но и в других странах (США, Канаде, Франции, Японии), где в частности, очень остро встал вопрос о возможности и технологии продления назначенного ресурса АЭС [2].

Если абстрагироваться от конкретного целевого назначения систем подобного типа, можно выделить их следующие общие особенности: важность выполняемых функций и связанную с этим высокую цену отказа, многоуровневость иерархической структуры, наличие в составе подсистем элементов с принципиально различающимися механизмами развития отказов (механических, электрических, электронных); различные виды резерва (структурный, функциональный, временной, информационный); наличие в системе как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых объектов; неравнозначность подсистем и элементов по их роли в обеспечении функционирования системы в целом; многорежимность и многоэтапность функционирования; наличие в системе как уникальных, малосерийных элементов, так и элементов массового применения.

Из анализа указанных особенностей видно, что статистические и физико-статистические методы могут быть использованы для оценивания и прогнозирования показателей долговечности только части элементов и устройств из состава оборудования сложной системы. В целом же проблема прогнозирования долговечности подобных объектов требует применения принципиально отличающегося подхода. При этом данный подход должен обеспечивать дифференцированное применение различных критериев предельного состояния применительно к различным группам оборудования: неустранимое снижение уровня надежности ниже установленных пределов – для высокот ответственных групп элементов, неустранимый отказ и неустранимое снижение технико-экономической эффективности эксплуатации

– для остальных групп элементов; комплексное использование всех видов исходной информации (статистической, измерительной, экспертной); построение интегрированных моделей «объект – система восстановления ресурса» с возможностью формирования предельных условий дальнейшей эксплуатации; возможность получения количественных значений показателей ресурса (остаточного ресурса) для любой составной части системы и системы в целом; возможность ранжирования составных частей системы по степени вклада в общий ресурс с учетом вклада элементов системы восстановления ресурса; возможность использования физико-статистического и статистического подходов к моделированию процессов деградации отдельных составных частей системы.

Таким требованиям удовлетворяет интегральный подход к прогнозированию показателей долговечности, основанный на построении структурных моделей предельного состояния объекта, с формализацией всех причинно-следственных связей между уровнями «элемент», «подсистема», «система» (либо «элемент», «система», «комплекс систем»), приводящих к предельному состоянию отдельных составных частей объекта и, в итоге, при определенных условиях – к предельному состоянию объекта в целом. Подход основан на дифференцированном оценивании роли элементов объекта (групп элементов объекта) на его переход в предельное состояние при комплексном использовании различных типов критериев предельного состояния и видов исходной информации о изменении характеристик долговечности составных частей объекта эксплуатации.

Рассмотрим особенности применения интегрального подхода к прогнозированию предельных сроков эксплуатации наземных комплексов на примере стартовых комплексов (СК) ракет космического назначения. Стартовый комплекс является сложной, многоуровневой системой с большим числом разнотипных элементов и разветвленными связями между ними. В структуре СК, как сложной системы, присутствуют как элементы общепромышленного назначения массового применения с относительно невысокой ценой отказа, так и уникальные элементы, выполняющие особо ответственные функции. И те и другие могут относиться к категории как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых.

На рисунке 1 приведена схема классификации элементов оборудования СК по двум основным признакам: затратам на восстановление ресурса и последствиям отказа. С точки зрения затрат времени, материальных и финансовых средств на восстановление ресурса, все элементы оборудо-

КОСМОС

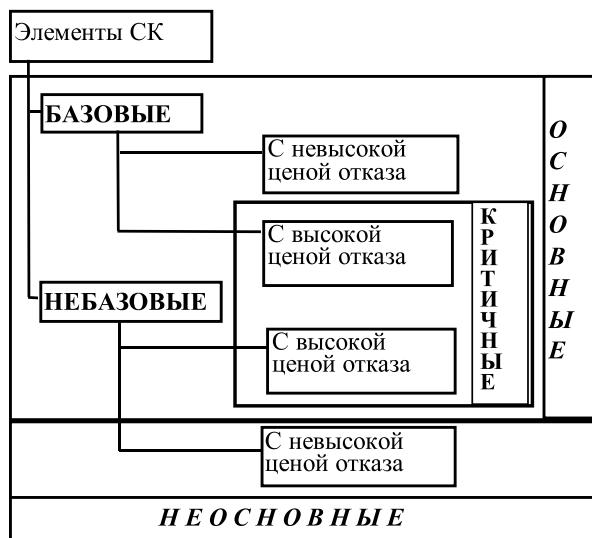


Рис. 1

дования и сооружений СК могут быть разделены на базовые и небазовые.

Ресурс базовых элементов может быть восстановлен принципиально только в ходе капитального ремонта СК. Ресурс небазовых элементов восстанавливается в ходе проведения ремонтно-восстановительных и ремонтно-профилактических работ. И те и другие элементы могут быть с высокой либо невысокой ценой отказа. Критичными элементами будем называть базовые и небазовые элементы с высокой ценой отказа. Критичные элементы совместно с базовыми некритичными являются основными, а небазовые с невысокой ценой отказа — неосновными элементами СК. На рисунок 2 поясняется механизм дифференцированного применения различных критериев перехода элементов (групп элементов СК) в предельное состояние.

Для критичных элементов СК критерием предельного состояния является неустранимое снижение надежности ниже заданного уровня. Предельный уровень надежности обычно указывается в конструкторской документации. Критерием предельного состояния базовых некритичных элементов является неустранимый отказ. Неосновные элементы эксплуатируются до предельного состояния, связанного либо с неустранимым отказом, либо с неустранимым возрастанием эксплуатационных затрат выше нормы.

Исходная информация о ТС элементов СК разнородна и в общем виде может быть представлена в виде статистических выборок различного объема, динамических рядов наблюдений за контролируемыми параметрами и экспертных суждений и выводов (в том числе – некоторой предыстории решений по управлению ТС различных составных

Виды критериев ПС

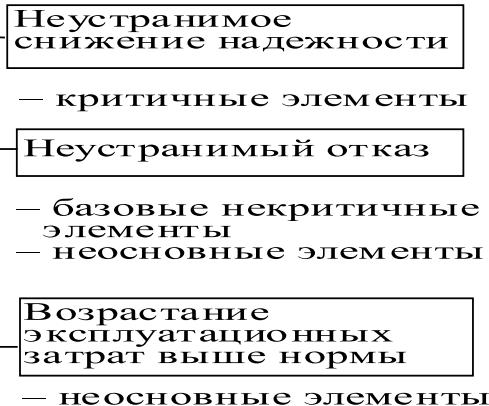


Рис. 2

частей СК в условиях априорной неопределенности). Проведенный анализ показал, что методологической основой формирования интегрированных систем прогнозирования показателей долговечности СК может являться аппарат структурного анализа надежности сложных систем. В частности, деревьев событий. В отличие от известных результатов в этой области, изложенных в трудах И.А. Рябинина, Г.Н. Черкесова [3], В.А. Зеленцова, В.Г. Афанасьева [4], Б. Диллона, Ч. Сингха [5] и др., где рассматриваются различные аспекты применения деревьев событий для анализа надежности структурно-сложных систем, когда исследованию подвергаются только собственно элементы объекта эксплуатации, в разрабатываемом подходе границы модели могут быть существенно расширены и включают как сам объект, так и элементы системы восстановления его ресурса. Это позволяет комплексно учесть при расчетах показателей долговечности факторы, ограничивающие возможности восстановления, и проранжировать их по значимости с целью выработки дальнейших решений по управлению техническим состоянием СК и его составных частей.

На рисунке 3 показана схема организации прогнозирования показателей долговечности с использованием интегрированных структурных моделей предельного состояния СК.

Прогнозирование показателей долговечности СК включает следующие этапы:

1. Анализ объекта прогнозирования. В ходе анализа элементы СК разделяются на типовые группы согласно схеме (см. рис. 1). Назначаются критерии предельных состояний по группам элементов. Выделяются восстанавливаемые и невосстанавливаемые элементы. Проводится анализ системы восста-

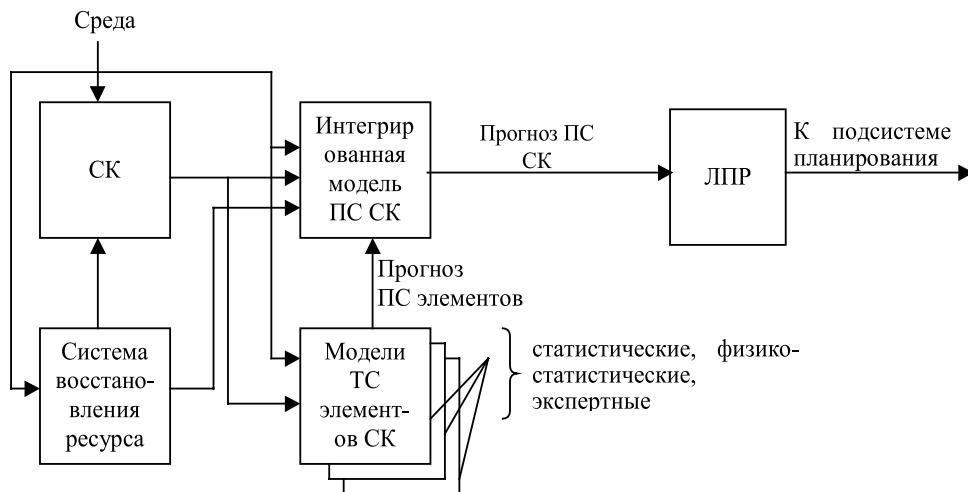


Рис. 3

новления ресурса, определяются предельные условия возможности восстановления по каждой группе восстанавливаемых элементов. Определяются и формулируются условия неустранимости снижения ресурсных характеристик по каждому из критериев предельного состояния и каждой группе элементов СК. Составляется дерево предельных состояний (ДПС) СК с учетом системы восстановления ресурса. Выделяются для каждого элемента ДПС доступные виды и источники информации. Выбирается базовый метод (группа методов) прогнозирования показателей долговечности для каждого элемента (группы элементов). Обосновывается метод объединения (комбинирования) результатов прогнозирования в случае применения нескольких методов прогнозирования показателей долговечности для одного элемента.

2. Сбор исходных данных. Осуществляется сбор исходных данных о ТС элементов объекта и системы восстановления его ресурса (статистических, физико-статистических и экспертных).

3. Прогнозирование показателей ТС элементов. Прогнозирование осуществляется с использованием моделей изменения ТС элементов СК и системы восстановления ресурса на основе статистического, физико-статистического либо экспертного подхода. Возможны их сочетания для каких-либо элементов. В этом случае рассчитывается комбинированный прогноз. Результатами прогнозирования являются различные вероятности (в зависимости от типа элемента и критерия его предельного состояния): вероятность отказа, вероятность снижения надежности функционирования ниже заданного уровня, веро-

ятность возрастания эксплуатационных затрат выше нормы.

4. Прогнозирование показателей долговечности СК. Прогнозирование показателей долговечности СК осуществляется на основе дерева предельных состояний СК с использованием логико-вероятностных методов. Исходными данными при этом являются результаты прогнозирования ТС и показателей долговечности элементов (групп элементов) объекта и системы восстановления ресурса.

5. Анализ результатов прогнозирования. Проводится сравнительный анализ вклада элементов (групп элементов) объекта и системы восстановления ресурса в общую долговечность СК. Осуществляется ранжирование элементов дерева предельных состояний по степени критичности влияния на общий ресурс. Оценивается точность и достоверность результатов прогнозирования. Определяются направления совершенствования процедур прогнозирования.

Литература

1. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высш. школа, 1981.
2. Острайковский В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981.
4. Афанасьев В.Г., Зеленцов В.А., Миронов А.Н. Методы анализа надежности и критичности отказов сложных систем. – Изд-во МО РФ, 1992.
5. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: Мир, 1984.