

УДК 629.3.015

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук, А.В. ВЕРБИЦКИЙ
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Д.В. МИШУТА, С.В. СИРЕНКО
ООО «Мидивисана», Минск

РАСЧЕТ РЕАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН. МЕТОДИКИ, ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА, ПРИМЕРЫ

Приведен обзор нормативных документов, методик и программных средств ведущих зарубежных компаний ReliaSoft и Relex Software в области расчета надежности технических систем. Описаны отечественные методики и программное обеспечение для расчета надежности машин, построенные на основе моделирования связанных отказов, сложной логики предельных состояний и вариации условий их эксплуатации. Представлены примеры использования разработанных программных средств для расчета показателей безотказности и долговечности на стадии виртуального проектирования изделий

Введение

Отечественные специалисты при создании сложных технических изделий стоят перед выбором: использовать зарубежные программные пакеты, ориентироваться на отечественные разработки в области расчетов надежности, применять те и другие или обходиться без каких-либо расчетов надежности. Цель статьи — помочь заинтересованным научным и инженерно-техническим работникам в решении поставленных вопросов.

В работе [1] рассмотрены проблемы, связанные с расчетом реальной надежности машин, приведены теоретические положения и методы, направленные на их разрешение. Данная статья является продолжением и развитием указанных положений и методов в части их прикладной программной реализации.

Зарубежные нормативные документы, методики и прикладные программные пакеты по рассматриваемому вопросу в отечественных изданиях практически не освещаются. Вместе с тем зарубежные производители сложных технических изделий широко используют программное обеспечение, поставляемое на мировые рынки компаниями ReliaSoft, Relex Software [2, 3] и другими в области расчетов и оценок надежности, предусмотренных различными стандартами.

Поэтому первый раздел статьи содержит обзор нормативных документов и возможностей зарубежных программных пакетов по расчету надежности и решению сопутствующих задач. Во втором разделе статьи рассмотрен программный пакет собственной разработки, построенный на представленных ранее методиках [4–6]. В третьем разделе проводится иллюстративный пример расчетов сложных мобильных систем, проведенных с использованием разработанного программного обеспечения [7].

Нормативные документы, методики и программные средства ведущих зарубежных разработчиков в области расчета надежности технических систем

Зарубежные промышленные компании широко используют нормативные документы, регламентирующие методы и программное обеспечение, построенное на их основе, в процессе разработки и производства продукции. К указанным документам относятся: Telcordia (Bellcore), IEC 62380 (RDF), TR-332, Prism, NSWC-98/LE1, CNET93, HRD5, China 299B, SAE ARP 5580, NUREG-0492.

Для продукции военного назначения используются стандарты серии «MILITARY HANDBOOK» и «MILITARY STANDARD». К ним относятся MIL-HDBK-472, MIL-STD-1629, MIL-HDBK-217, MIL-HDBK-189, MIL-HDBK-259, MIL-HDBK-781(A/D), MIL-HDBK-1823,

MIL-STD-756B, MIL-STD-1843, MIL-STD-781D и многие другие. Стандарты содержат положения в области расчетов надежности, исследования ремонтпригодности систем, анализа видов, последствий и критичности отказов, анализ дерева неисправностей и другие.

В нашей стране нормативная база в этой области находится в стадии формирования в основном путем перевода и ввода в действие западных стандартов. При этом происходит отход от терминологии ГОСТов и понятий школы надежности СССР, приверженцем которой остается Россия. В результате отечественные специалисты могут оказаться в ситуации, когда для различного вида экспортной продукции понадобится применение различных подходов, методов и программного обеспечения.

Программные пакеты, как правило, решают однотипные задачи и отличаются незначительными деталями представления информации, интерфейса и форматом данных.

Компания ReliaSoft представляет на рынке программный комплекс по расчету и управлению надежностью [2], включающий программные модули, показанные на рисунке 1.

Один из основных модулей — BlockSim (рисунок 2) — представляет собой программный продукт для анализа надежности и ремонтпригодности системы. Используя Блок-схемы расчета надежности (Reliability block diagram, RBD) или Анализ дерева неисправностей (Fault tree analysis, FTA), модуль поддерживает методы анализа, охватывающие надежность, работоспособность, техническое обслуживание, оптимизацию надежности, производительность, распределение ресурсов, рабочий цикл и другие анализы.

BlockSim обладает расширенными возможностями для моделирования сложных конфигураций, распределения нагрузок, этапов и рабочих циклов, позволяет проводить анализ для ремонтируемых и невосстанавливаемых систем.

Компания Relix располагает пакетом средств анализа Relix Studio. Он применяется для задач по обеспечению надежности и включает десять отдельных аналитических модулей, которые как индивидуально, так и совместно могут применяться при реализации решений обеспечения надежности, отвечающих специальным требованиям пользователя. Общие функциональные возможности среды Relix включают настраиваемый, интуитивно понятный и удобный интерфейс, а также средства навигации, процедуры на основе мастеров, единую платформу управления базами дан-

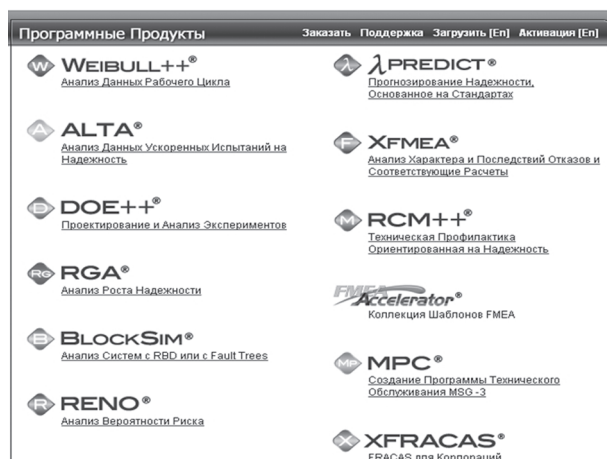


Рисунок 1 — Программные модули расчета надежности компании ReliaSoft

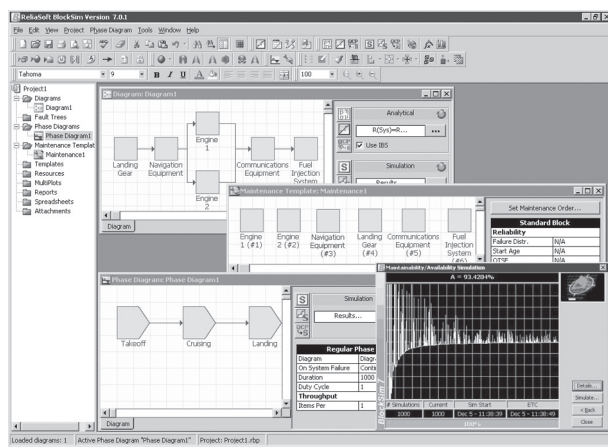


Рисунок 2 — Программный модуль BlockSim компании ReliaSoft: вид рабочего окна

ных, встроенные библиотеки и мощные средства создания отчетов и графиков. Кроме того, Relix соответствует стандартам пользовательского интерфейса Microsoft и интегрируется со стандартными средствами Microsoft.

Ниже приводится краткая характеристика аналитических модулей комплекса Relix.

1. *Reliability Prediction* (прогноз надежности). Служит для расчета вероятной частоты отказов компонентов систем, помогает определять соответствие рабочих характеристик изделия в предполагаемых условиях поставленным целям, т.е. отраслевым стандартам, требованиям клиента и целям организации. Применяется для оценки надежности изделий на ранних этапах проектирования для выявления основных факторов сбоев, оценки влияния среды и нагрузки на систему, а также для быстрого поиска компромиссных конструкторских решений. Библиотеки компонентов Relix, объем которых превышает 400000 компонентов, дают возможность экономить время и средства, за счет ускоренного процесса подготовки анализов надежности.

2. *OpSim* (оптимизация и моделирование). Сочетает средства создания блочных диаграмм надежности с инструментами анализа методом оптимизации и моделирования. Методы системного моделирования помогают проводить анализ надежности, доступности, рабочих характеристик и стоимости срока службы сложных реальных систем.

3. *FMEA* (анализ характера и последствий отказов). Служит для согласованного определения потенциальных состояний отказа в системах. Позволяет аналитикам выявлять и классифицировать сбои, а также разрабатывать и выполнять планы по их устранению.

4. *Fault Tree* (дерево неисправностей). Предназначен для создания графического представления ключевых аспектов безопасности/неисправностей изделия и выявления возможных причин и факторов, которые на них влияют. Производит количественную оценку факторов риска и надежности системы для принятия решений в отношении конструкции, технического обслуживания и управления с целью снижения вероятности отказов.

5. *FRACAS* (система регистрации сбоев, анализа и корректирующих действий). Регистрирует данные о неполадках и реализует обратный поток данных от места эксплуатации изделия к инженерам-конструкторам.

6. *Weibull* (распределение Вейбулла). Упрощает сбор и анализ данных на всех этапах жизненного цикла изделия — от проекта и разработки до испытаний, эксплуатационных исследований и возвратов — с целью выявления

тенденций сбоев и прогнозирования их характера. Помогает отслеживать рост надежности, анализировать ухудшение изделий, планировать процедуры испытаний, находить оптимальную периодичность технического обслуживания и прогнозировать гарантийные случаи.

7. *Maintainability Prediction* (прогнозирование ремонтпригодности). Построен на основе стандартов Министерства обороны США, позволяет проводить анализ показателей технического обслуживания и ремонта систем и прогнозировать сроки, трудозатраты обслуживающего персонала и другие параметры обслуживания.

8. *Markov* (анализ марковского процесса). Инструмент построения диаграмм смены состояний, используемый в моделировании и анализе сложных систем для вычисления основных показателей их работы и надежности, включая пропускную способность и доступность для различных состояний.

9. *Life Cycle Cost* (анализ затрат в течение жизненного цикла продукта). Сочетает в себе определяемые пользователем уравнения и стандартные средства анализа структуры распределения затрат, используемые для прогнозирования стоимости владения изделием в течение всего срока службы — от проектирования и производства до технического обслуживания, ремонта и утилизации. Подсчитывает чувствительность и чистую приведенную стоимость и позволяет сопоставлять стоимость и результативность альтернативных сценариев.

10. *Human Factors Risk Analysis* (анализ рисков, обусловленных человеческим фактором). Основан на методике NASA, предоставляет пошаговый процесс анализа изделий и систем, помогая снизить частоту и серьезность ошибок оператора.

Особенности зарубежных пакетов. Ключевыми являются модули, связанные с расчетом надежности. Эти модули основаны на применении блок-схем надежности (RBD) и схем деревьев неисправностей (Fault tree diagram, FTD).

Деревья неисправностей и блок-схемы надежности лежат в основе символических аналитических логических методов, которые могут быть применены для анализа системной надежности и связанных с нею характеристик. Хотя символы и структуры этих двух типов диаграмм (схем) отличаются, большинство логических конструкций FTD может быть также смоделировано с помощью RBD.

Концепция анализа деревьев неисправностей была разработана в 1962 году в лабораториях Bell Telephone Co для американских ВВС и использования в системе Minuteman. Позднее она была адаптирована и широко использована компанией Boeing.

В схеме деревьев неисправностей (FTD) линии связывают соответствующие события и условия с применением стандартных логических символов (AND, OR и т.д.).

На рисунке 3 а показана простая схема дерева неисправностей, в которой могут иметь место события А или В, приводящие к отказу системы — выходному событию. В этой схеме два события соединяются логическим элементом OR.

Эквивалентом этой схеме является блок-схема надежности (RBD), которая представляет собой простую последовательную систему с двумя блоками А и В (рисунок 3 б).

Несмотря на активное продвижение на мировые рынки методик и программного обеспечения, основанного на RBD и FTD, их применение остается достаточно сложным, особенно для многоуровневых машиностроительных объектов со сложной логикой предельных состояний, характерной для мобильной техники.

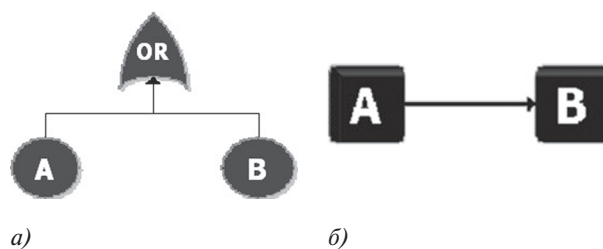


Рисунок 3 — Схема надежности простейшей системы из двух элементов А и В: а) в виде дерева неисправностей; б) в виде блок-схемы надежности

На рисунке 4 представлена иерархическая схема машины, состоящей из шести подсистем в виде двух уровней: машина, подсистемы.

Подсистемы 1 и 2 описаны как элементы типа 1, подсистемы 3—6 — как элементы типа 2. Выход из строя машины квалифицирован как отказ одной из подсистем типа 1 и трех подсистем типа 2. На рисунке 5 показаны возможные варианты RBD, а на рисунке 6 — вид FTD для рассматриваемой ситуации.

На рисунке 7 представлены все возможные комбинации событий, сгенерированные в пакете на основании дерева неисправностей, изображенного на рисунке 6. Они совпадают с вариантами комбинаций, показанных на рисунке 5. То есть непосредственно в расчете используется аппарат RDB.

Принципиальным ограничивающей особенностью зарубежных методик и пакетов является их сфера применения, сводящаяся к задачам традиционной (системной) теорией надежности. При этом исходным пунктом для проводимых расчетов являются данные по надежности входящих в систему элементов. Такой подход в определенной степени оправдан для электронных систем, но не пригоден для механических объектов. Для механических объектов нельзя заранее задать показатели надежности, они определяются конструктивными, технологическими, эксплуатационными факторами и условиями применения машины. Кроме того отказы механических объектов имеют зависимый, коррелированный характер.

Отечественные методики и программное обеспечение в области расчета надежности машин

Методические особенности. В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработаны методики и программное обеспечение для прогнозирования надежности деталей, сборочных единиц, машин и машинных комплексов при виртуальном проектировании. На их основе осуществляется научная поддержка процессов прогнозирования и обеспечения надежности машин, в том числе создаваемых под конкретные условия их применения, а также виртуальных испытаний на надежность машин, их агрегатов и систем.

Оригинальность и новизна разработки заключается в возможности прогнозировать надежность мобильных машин, начиная с низших механических уровней конструктивных элементов и завершая системными уровнями с воспроизведением сложной логики предельных состояний машин, агрегатов, систем; осуществлять расчет показателей безотказности и долговечности на основе статистического моделирования потока отказов и предельных состояний машин как многоуровневых систем.

Условия эксплуатации для любой технической системы индивидуальны. Разработанное программное обеспечение

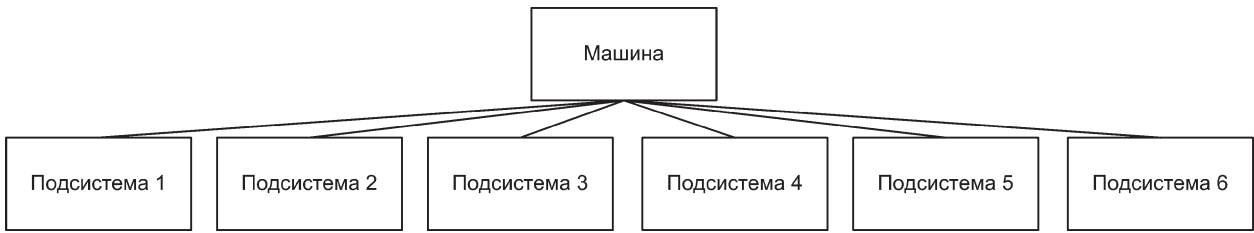


Рисунок 4 — Иерархическая схема объекта (машины) из шести подсистем

позволяет учитывать особенности условий эксплуатации. Для транспортных средств, возможно, классифицировать по разработанной методике условия эксплуатации исходя из условий движения, типа местности и дорожных условий.

Разработка имеет следующие особенности: использование имитационных моделей, основанных на методе статистических испытаний с воспроизведением факторов, приводящих к зависимостям при отказах элементов; воспроизведение иерархической структуры изделия как основы для составления его схем отказов и предельных состояний;

возможность расчетов при различном представлении машины: в виде агрегатной и узловой структуры, принципиальной (кинематической) схемы; полного геометрического описания сборочных единиц, деталей — для определения напряжений и их повреждающего действия;

возможность использования разнообразных моделей повреждения и отказов, включая их реализацию в виде зависимостей «несущая способность — ресурс» (ресурсно-прочностные кривые) в различных условиях эксплуатации;

вероятностное представление спектра условий эксплуатации;

воспроизведение предельных состояний и потоков отказов для определения всех предусмотренных действующими и перспективными стандартами показателей надежности;

единое расчетное ядро для всех возможных представлений изделия при расчете показателей надежности;

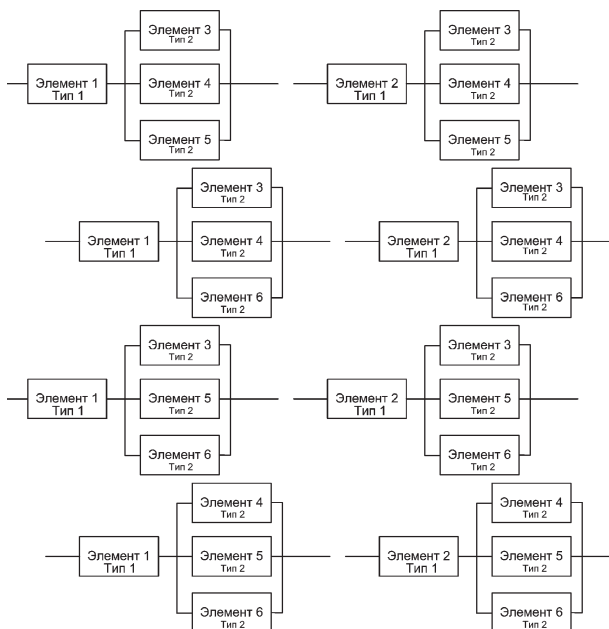


Рисунок 5 — Варианты RBD для описания отказов машины

интерфейс с элементами автоматизации отображения схем отказов и предельных состояний для подготовки данных по структуре изделия и схем расчета надежности.

Разработанное программное обеспечение расчета надежности машин включает многоуровневый расчет ресурса по схеме «условия эксплуатации — ресурс» с моделированием машины как механического объекта с зависимыми компонентами. Предусматривается использование метода статистических испытаний, варьирование условий эксплуатации и несущей способности конструктивных элементов. Начальным уровнем является моделирование предельных состояний отдельных конструктивных элементов, затем рассчитываются ресурсы деталей, узлов, агрегатов и механического объекта в целом.

Для реализации рассмотренной сложной логики расчета ресурса используется разработанное новое представление в виде схем отказов/предельных состояний. На рисунке 8 показан вид схемы для машины, представленной выше на рисунке 4. Видно, что предлагаемая схема значительно проще для восприятия и построения по сравнению со схемами RBD (см. рисунок 5) и FTD (см. рисунок 6).

Разработан специальный программный модуль, который предназначен для проектирования ресурсных схем. Модель взаимосвязи компонентов в программном комплексе расчета надежности представлена на рисунке 9.

Программная реализация. Программный комплекс позволяет задать аналитическим способом структуру объекта, взаимосвязи между элементами, принципы отказов каждого элемента, характеристики надежност-

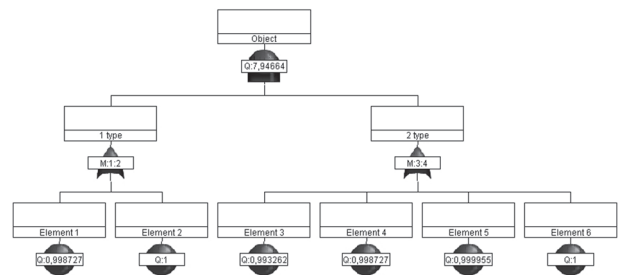


Рисунок 6 — Вид FTD для описания отказов машины в пакете Relex Studio FTA

1	Element 2	Element 4	Element 5	Element 6
2	Element 1	Element 4	Element 5	Element 6
3	Element 2	Element 5	Element 6	Element 3
4	Element 2	Element 4	Element 6	Element 3
5	Element 1	Element 5	Element 6	Element 3
6	Element 2	Element 4	Element 5	Element 3
7	Element 1	Element 4	Element 6	Element 3
8	Element 1	Element 4	Element 5	Element 3

Рисунок 7 — Возможные комбинации событий FTD при описании отказов машины в пакете Relex Studio FTA

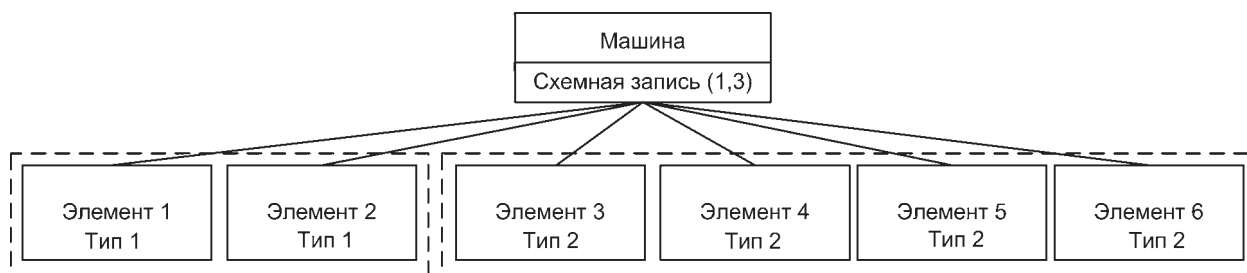


Рисунок 8 — Описание машины схемой предельных состояний



Рисунок 9 — Модель взаимосвязи компонентов в разработанном программном комплексе расчета надежности

ти для каждого элемента объекта. На основании заданной структуры строится схема, и формируются файлы преобразованных исходных данных для последующего проведения расчетов, построения диаграмм и выполнения анализа. На рисунке 10 представлено «окно» программы по формированию ресурсной схемы машины, вводу параметров элементов и их взаимодействия для дальнейших расчетов.

На основании введенных исходных данных, в главном окне программы, происходит «визуальное» построение иерархической схемы предельных состояний и параметров элементов. Этот этап ввода данных позволяет контролировать, анализировать и корректировать процесс расчета параметров надежности проектируемого объекта.

Для моделирования потока отказов разработан отдельный программный модуль. Моделирование потока отказов компонента может быть заменено моделированием первых отказов нескольких элементов, имеющих распределение отказов такое же, как у рассматриваемого компонента. Число элементов определяется исходя из времени рабочего периода и средней наработки на отказ объекта.

Примеры использования разработанных методик и программных средств

Ниже представлены иллюстративные примеры расчетов на стадии виртуального проектирования объекта, состоящего из двух частей: автотранспортного средства (АТС) и кузова-контейнера с техническими средствами. Подсистемы АТС включают шасси (тягач) и прицеп (полуприцеп). Технические средства в кузовах-контейнерах состоят из подсистем: 1) вентиляция; 2) освещение; 3) фильтро-вентиляционная система; 4) отопление; 5) энергетическая система; 6) кабельная система; 7) гидравлическая система; 8) система развешивания.

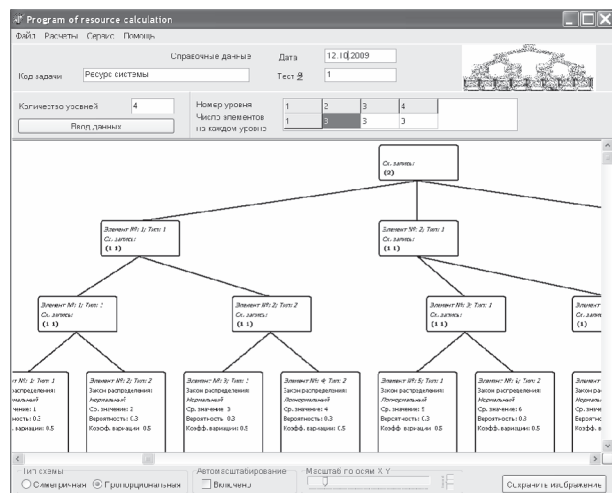


Рисунок 10 — Окно программы при формировании схемы предельных состояний объекта расчета

При оценке наработки на отказ учитываются отказы шасси, прицепа и элементов подсистем кузова контейнера.

Поток отказов изделия формируется из отказов подсистем и элементов более низкого уровня. Например, если в автотранспортную подсистему (АТС) входит один автомобиль с прицепом и отказ каждого из этих двух элементов приводит к отказу изделия в целом, то в потоке отказов изделия должны быть представлены отказы двух упомянутых элементов.

На рисунке 11 показана схема отказов (СО) исследуемого объекта.

При оценке срока службы учитываются предельные состояния 1) автотранспортной части и 2) части кузова-контейнера с подсистемами.

Для первой части предельное состояние — исчерпание ресурса шасси или прицепа (одного из них); для второй части предельное состояние — исчерпание ресурса кузова-контейнера и трех его подсистем: фильтро-вентиляционной, энергетической и кабельной, — всех объектов. Предельное состояние изделие — исчерпание ресурса одной из частей.

Общая схема предельных состояний (СПС) объекта представлена на рисунке 12. СПС трактуется аналогично схеме отказов в части перехода от ПС элементов к ПС подсистем и далее к ПС изделия. Отличием от моделирования потока отказов является расчет показателей изделия по его СПС, который завершается определением среднего значения срока службы и других показателей изделия аналогично расчетам показателей подсистем на промежуточном уровне. В СПС представлены элементы, которые определяют срок службы объекта, исключены быстро заменяемые узлы, которые не относятся к определяющим ресурс основными составными частям.

Расчеты выполнены с использованием программного обеспечения, реализующего вышеприведенную методику. Результаты расчетов представлены в таблице.

Поскольку при расчете показателей безотказности результаты зависят от начальной точки по времени выборки, то расчеты выполнены для трех начальных точек отсчета и усреднены.

Заключение

Зарубежные разработчики методических и программных средств по расчету надежности находят широкое поле деятельности, работая с компаниями, производящими сложные технические изделия. При этом оценка надежности и связанные с ними задачи, являются неотъемлемой частью разработки новых изделий и успешного вывода их на мировой рынок.

Отечественные производители действуют в условиях неразвитой нормативной базы и отсутствия приемлемого программного обеспечения для задач оценки и обеспечения надежности.

В значительной степени эта проблема может быть решена на основе представленных отечественных методик и программного обеспечения, которые позволяют рассматривать автомобиль и другие мобильные машины в виде сложных многоуровневых систем с зависимыми отказами компонентов, а также учитывать различные условия их эксплуатации. В этой части отечественные методические разработки превосходят известные зарубежные, которые ориентированы в основном на электрические и электронные системы, а механические системы отображаются без их особенностей (вариация условий эксплуатации, ресурсные связи компонентов, изменение показателей надежности в зависимости от конструктивного оформления и условий применения компонента и другие).

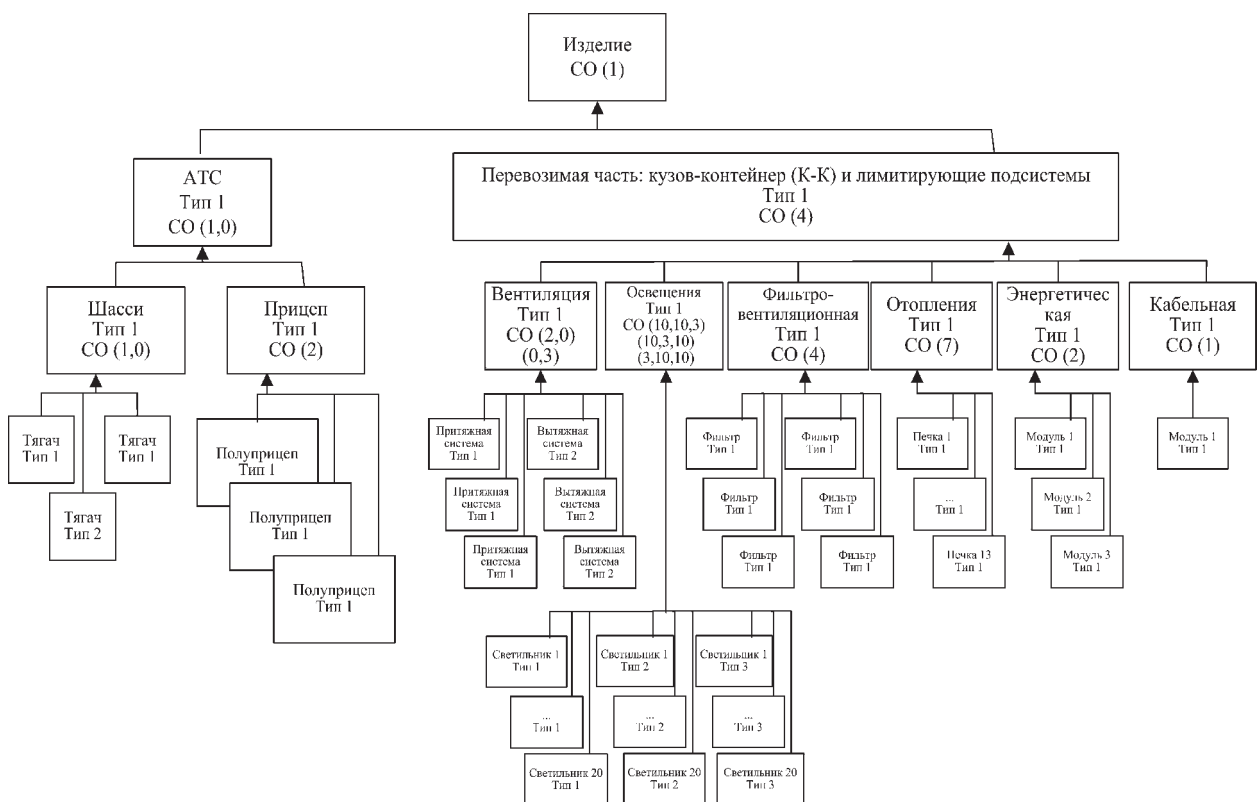


Рисунок 11 — Схема отказов изделия

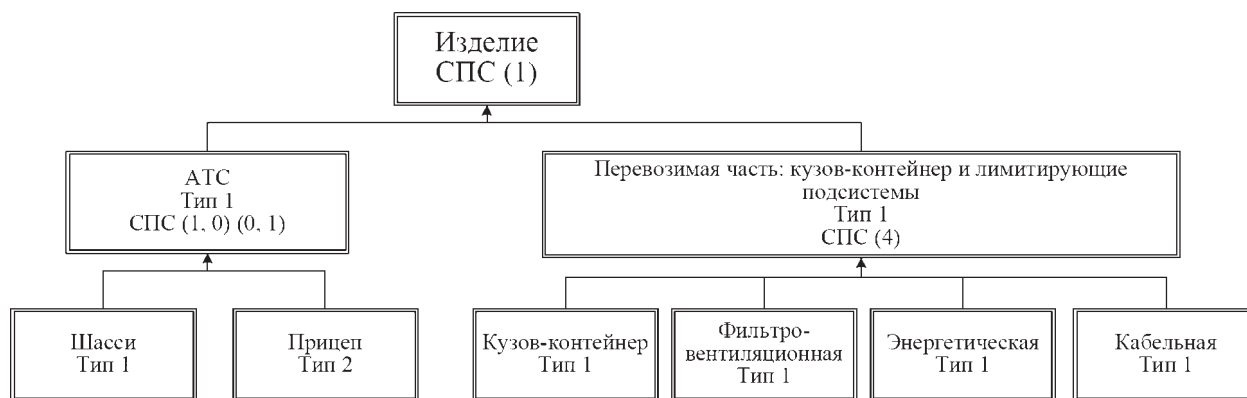


Рисунок 12 — Схема предельных состояний изделия

Современные методы проектирования во все большей степени позволяют создавать виртуальные модели деталей, узлов и машины в целом и моделировать рабочие процессы. Методы расчета надежности, используемые на практике, не пригодны для систем виртуального проектирования при параллельной работе расчетчиков и конструкторов. Преобладают несвязанные методы расчета отдельных элементов, нет корректных методик расчетов показателей надежности машин в целом. Имеет место проблема разработки методов, необходимых для оперативной оценки и обеспечения надежности при различных стадиях и представлениях машины и интегрированных в системы виртуального проектирования. Разрабатываемые отечественные методики и программные комплексы направлены на решение указанной проблемы, которая является составной частью общей проблемы развития теории и разработки новых методов расчета надежности машин.

Таблица — Показатели безотказности и долговечности изделия

Средний срок службы, лет	Средняя наработка на отказ, ч			
	Начальная точка — 0 ч	Начальная точка — 3650 ч	Начальная точка — 7300 ч	Среднее значение
21,0	1042,9	912,5	912,5	956,0

Список литературы

1. Альгин, В.Б. Расчет реальной надежности машин. Подходы ресурсной механики / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 1(14). — С. 10—20.
2. Mode of access: <http://www.reliasoft.com/BlockSim/features1.htm>.
3. Mode of access: <http://pro-technologies.ru/product/relex>.
4. Альгин, В.Б. Методика и пакет программ по расчету надежности технических систем / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий // Механика-2007: сб. науч. тр. III Белорус. конгр. по теорет. и прикл. механике; ОИМ НАН Беларуси, 16—18 окт. 2007 г. / ОИМ НАН Беларуси; под общ. ред. акад. М.С. Высоцкого. — Минск, 2008. — С. 165—170.
5. Вербицкий, А.В. Определение спектра относительной продолжительности условий эксплуатации автомобиля на основе нечеткой логики для задач оценки надежности / А.В. Вербицкий, В.Б. Альгин // Механика—2009: сб. науч. тр. IV Белорус. конгр. по теорет. и прикл. механике; ОИМ НАН Беларуси, Минск, 22—24 дек. 2009 г. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2009. — С. 188—194.
6. Альгин, В.Б. Методики и программное обеспечение для задач оценки ресурса мобильной техники в различных условиях эксплуатации / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий // Механика — машиностроению: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении» и VI Междунар. симпоз. по трибофатике МСТФ 2010; ОИМ НАН Беларуси, Минск, 26—29 окт. 2010 г. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2010. — С. 166—169.
7. Расчет надежности объекта со сложной логикой предельных состояний составных частей в варьируемой эксплуатационной среде: комп. программа: св-во 145 Респ. Беларусь / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий; правообладатель ОИМ НАН Беларуси. — № С20100017; заявл. 23.02.10; опубл. 18.03.10 // Реестр зарегистрир. компьютерных программ. — Минск: Нац. центр интеллектуал. собственности, 2010.

Algin V.B., Verbitski A.V., Mishuta D.V., Sirenko S.V.

Calculation of real reliability for machines. The techniques, software tools and samples

A survey of regulations, techniques and software tools of the leading foreign developers in calculating the reliability of technical systems ReliaSoft and Relex Software are carried out. Techniques and software tools of our country for calculating the machines reliability developed on the basis of research-related failures, the complex logic of limiting states and variations of operation conditions are described. Samples of usage of developed software tools for calculating reliability and durability indexes for the stage of the virtual machines designing are presented.

Поступила в редакцию 23.03.2011