

конечных и связующих вершин. Получим матрицу  $D = \|d_{ij}\|$ .

2. Образует массивы; простых контуров  $B$ ; рангов простых контуров  $R$ ; контурных степеней дуг  $H$ ; вспомогательный массив  $Q$ .

3. В матрице  $D = \|d_{ij}\|$  находим  $\min \sum d_{ij}$ .

4. Заносим в массив  $Q$  последовательность из индекса  $i$  - строки с  $\min \sum d_{ij}$  и всех индексов  $j$  элементов  $d_{ij} = 1$  этой строки  $i_1(j_k) \in k$ .

5. В строке  $i = j, j \in k$  находим все  $d_{ij} = 1, j \in \{1, 2, \dots, l\}$ .

6. Сравниваем первый элемент множества  $\{1, 2, \dots, l\}$  с элементом последовательности  $k: c_k(j_k) = j_j$ . Если «да», то 7, иначе сравниваем следующий элемент.

7. Образует последовательность  $c_k, \{j_k\}, j_1$ .

8. Отбрасываем все элементы до повторяющегося элемента.

9. Подсчитываем ранг простого контура.

10. Сравниваем ранг простого контура с рангами, записанными в массиве  $R$ . Если «нет», то проверяем.

Для поиска оптимального набора дуг строим матрицу контуров и дополняем ее рангами простых контуров и контурными степенями дуг [3]. Ранг  $r$  простого контура равен числу дуг, входящих в этот контур. Контурная степень дуги графа  $G(U, V)$  равна числу простых контуров, в которые данная дуга входит.

Матрица контуров графа  $G(U, V)$  строится по следующему правилу:  $k_{ij} = 1$ , если  $j$  - я дуга принадлежит  $i$  - му простому контуру; 0 - в противном случае.

Матрицу контуров  $K = \|k_{ij}\|$  упрощаем за счет исключения подстолбцов, строго содержащихся в других столбцах.

В оптимальный набор включают те дуги, у которых наибольшая контурная степень или ранг контура  $r_i = 1$ . Упростим матрицу  $K = \|k_{ij}\|$ , вы-

черкивая столбцы  $j \in r_i$ . Последовательно, исключая столбцы и строки с  $r_i = 0$ , получим оптимальный набор дуг, разрыв которых преобразует замкнутую многоконтурную систему в эквивалентную ей прямую структуру:

1. Построить матрицу сильно связанного графа.  
2. Записать из массивов  $R$  и  $H$  ранги контуров и контурные степени дуг.

3. Определить столбцы, строго содержащиеся в других столбцах.

4. Исключить из матрицы  $K = \|k_{ij}\|$  зависимые столбцы.

5. Отыскать  $r_i = 1$ . Если нет, то 9.

6. Образовать массив  $S$  оптимального набора дуг и занести в него дуги, соответствующие элементам  $k_{ij} = 1$ .

7. Исключить строки, для которых  $r_i = 1$ .

8. Определить ранги контуров и контурные степени дуг упрощенной матрицы контуров. Перейти к 3.

9. Определить столбцы с наибольшей контурной степенью.

10. Составить из этих столбцов наименьший набор, который содержит единичные элементы во всех строках матрицы контуров.

11. Упростить матрицу контуров, исключая столбцы, строго содержащиеся в наборе.

Таким образом, формализация применения принципа модульного проектирования позволяет:

значительно снизить стоимость разработки и настройки систем подготовки авиационных специалистов;

построить процесс проектирования как процесс синтеза систем из стандартных типовых блоков - модулей;

использовать систему автоматизации проектирования систем подготовки;

автоматизировать поиск оптимальной технологии организации вычислительного процесса на ЦВМ для динамических моделей систем подготовки;

упростить и наглядно представить системобразующие связи в различных системах, обеспечивающих подготовку авиационных специалистов (технических, экономических, организационных, дидактических и т. п.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Малашин И. И., Сидорова И. И. Тренажеры для операторов АЭС. - М.: «Атомиздат», 1979. - 152 с.
2. Грундспеньск Я. А. Алгоритм нахождения собственных ориентированных циклов сильно связанного графа. - В сб.: Кибернетика и диагностика. Вып. V. Рига. «Зинатне», 1972, с. 85-93.
3. Lee W., Rudd D. F. On ordering of recycle calculations. - «AIChE Journ», 1966, v/ 12, № 6, p. 1184.

Жаднов В. В., Гаршин А. А.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВВФ НА НАДЕЖНОСТЬ ВЕРТОЛЕТНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Авионика современных вертолетов включает в себя ряд радиоэлектронных систем, таких как системы навигации, пилотирования, наведения и управления вооружением, связи и др. Современная тенденция развития бортовой вертолетной радиоэлектронной аппаратуры (ВРЭА) характеризуется увеличением числа выполняемых ей функций при одновременном ужесточении требований по надежности, что ведет к усложнению схем и конструкций.

Большое количество навигационной, связной, контрольной и др. видов ВРЭА, высокие скорости и особенности эксплуатации вертолетов обуславливают повышенные требования к конструкции и компоновке электронных модулей и блоков. Поэтому, основными требованиями, предъявляемыми при

проектировании ВРЭА, являются требования по снижению массогабаритных характеристик и энергопотребления, по обеспечению работоспособности в условиях повышенного уровня вибраций, ударов и т.д., что, в конечном итоге, и определяет повышенные требования по надежности.

Анализ причин отказов ВРЭА показывает, что значительное влияние на её эксплуатационную надежность оказывают внешние воздействующие факторы (ВВФ). Так, например, при увеличении температуры окружающей среды с 60 до 80 °С средняя наработка может снизиться более чем в 2 раза. Однако кроме температуры на ВРЭА действуют и другие факторы, перечень которых, согласно ГОСТ РВ 20.39.304 [1], приведен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень внешних воздействующих факторов

№	Воздействия	Наименование фактора
1	Климатические	повышенное давление воздуха или газа атмосферное пониженное давление изменение атмосферного давления пониженная температура среды повышенная температура среды повышенная влажность воздуха



		атмосферные конденсированные осадки пониженная влажность воздуха соляной туман солнечное излучение
2	Механические	случайная широкополосная вибрация акустический шум линейное ускорение сейсмический удар механический удар одиночного действия механический удар многократного действия
3	Бактериологические	плесневые грибы
4	Другие	Статическая пыль динамическая пыль агрессивные среды (озон, аммиак, двуокись азота, сернистый газ, сероводород)

Кроме того, и уровни ВВФ могут существенно различаться в зависимости от места установки аппаратуры на вертолёте. На рис. 1. показано условное деление вертолёта на зоны по уровням ВВФ по ГОСТ РВ 20.39.304 [1].



Рис. 2. Деление вертолёта на зоны по уровням ВВФ

Рассмотрим особенности расчёта показателей надёжности ВРЗА на примере системы связи «БРИЗ», устанавливаемой на вертолеты, выпускаемые ОАО «Камов». Система состоит из бортового и наземного комплектов. Аппаратура бортового комплекта устанавливается в зонах 3.1.1 и 3.1.2 (см. рис. 2). В состав бортового комплекта аппаратуры входят два блока (приемо-передающий антенно-электронный блок АЭБ-Б и блок цифрового приема передачи ЦПП-Б).

В соответствии с классификацией ОСТ 4Г 0.012.242 [2] данный расчёт представляет собой «Расчёт показателей надёжности РЭА по структурным схемам». Исходя из того, что критерием отказа системы связи является отказ любого её блока, то структурная схема надёжности (СНН) представляет собой «последовательную РЭА из л элементов» по классификации ОСТ 4Г 0.012.242 [2]. СНН системы связи «БРИЗ», соответствующая заданному критерию отказа приведена на рис. 3.

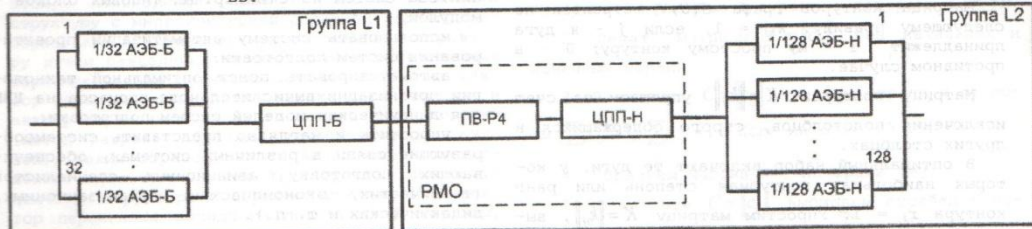


Рис. 3. Схема расчета надёжности системы связи «БРИЗ»

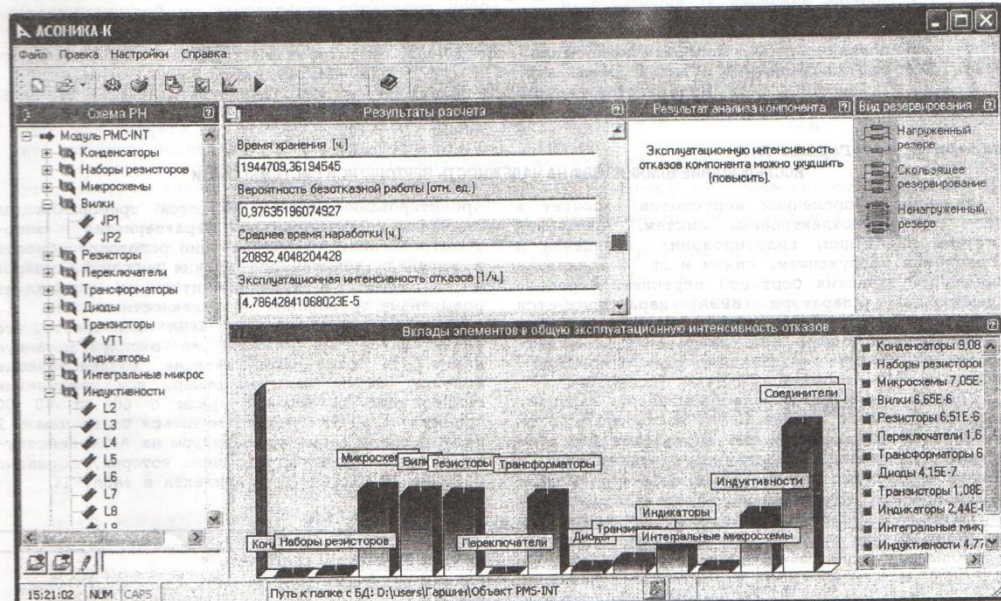


Рис. 4. Система АСОНИКА-К-СЧ: Результаты расчёта модуля PMS-INT (группа эксплуатации 3.1.1)



Исходными данными для расчёта надёжности системы связи «БРИЗ» являются характеристики надёжности её составных частей (блоков). В соответствии с классификацией ОСТ 4Г 0.012.242 [2] эти характеристики определяются по методике «Расчёт показателей безотказности электронного модуля первого уровня». В соответствии с этой методикой, интенсивность отказов электрорадиоизделий (ЭРИ) для соответствующих условий эксплуатации определяются по методике Справочника «Надёжность ЭРИ» [3].

Рассмотрим этот расчёт на примере модуля PMS-INT, который входит в состав блока ЦПП-В (см. рис. 3).

Для непосредственного проведения расчётов применялась система АСОНИКА-К-СЧ программного комплекса АСОНИКА-К [4]. На рис. 4 приведены результаты расчёта модуля PMS-INT.

Как видно из рисунка 4, эксплуатационная интенсивность отказов модуля составляет  $4,7864 \cdot 10^{-5}$  [ч<sup>-1</sup>].

Для оценки степени влияния ВВФ был проведен повторный расчёт модуля PMS-INT, но для группы эксплуатации 1.1 по классификации ГОСТ РВ 20.39.304 [1], т.к. значение  $K_0$  в этом случае равно 1 (см [3]) для всех классов ЭРИ. (Напомним, что коэффициент эксплуатации ( $K_0$ ) учитывает степень жесткости условий эксплуатации и показывает, во сколько раз интенсивность отказов ЭРИ в РЭА конкретного класса выше при всех прочих равных условиях, чем в наземной стационарной РЭА (группа 1.1)).

На рис. 5 приведены результаты расчёта модуля PMS-INT для группы эксплуатации 1.1.

Как видно из рис. 5, эксплуатационная интенсивность отказов модуля в этом случае составляет  $2,5663 \cdot 10^{-6}$  [ч<sup>-1</sup>].

Исходя из определения  $K_0$ , найдем его значения для модуля PMS-INT с целом:

$$K_0 = (4,7864 \cdot 10^{-5} / 2,5663 \cdot 10^{-6}) = 18,65. (1)$$

Время хранения [ч.]	36919848,9616224
Вероятность безотказной работы [отн. ед.]	0,99871766614333
Среднее время наработки [ч.]	389664,006278196
Эксплуатационная интенсивность отказов [1/ч.]	2,56631350057532E-6

Рис. 5. Система АСОНИКА-К-СЧ: Результаты расчёта модуля PMS-INT (группа эксплуатации 1.1)

Таким образом, влияние ВВФ приводит к снижению средней наработки более чем в 18,5 раз.

Однако,  $K_0$  представляет собой интегральную оценку степени влияния ВВФ на эксплуатационную надёжность модуля PMS-INT, поэтому для дифференцированной оценки влияния ВВФ воспользуемся методикой, приведённой в [5].

Согласно этой методике необходимо определить уровни ВВФ в месте установки ЭРИ. Расчёты уровней климатических и механических воздействий были проведены с помощью подсистемы АСОНИКА-ТМ системы АСОНИКА [4]. Для остальных видов воздействий ЭРИ уровни были приняты постоянными и равными значениям, приведённым в для ГОСТ РВ 20.39.304 [1] для группы 3.1.1. На рис. 6, в качестве примера, приведены результаты расчета при воздействии акустического шума в подсистеме АСОНИКА-ТМ [4], а на рис. 7 - фрагмент выходного файла.

Кроме того, для расчетов по методике [5] также необходимо знать распределение отказов аппаратуры, как по видам воздействий, так и по каждому из факторов. Распределение отказов по видам воздействий приведено на рис. 8.

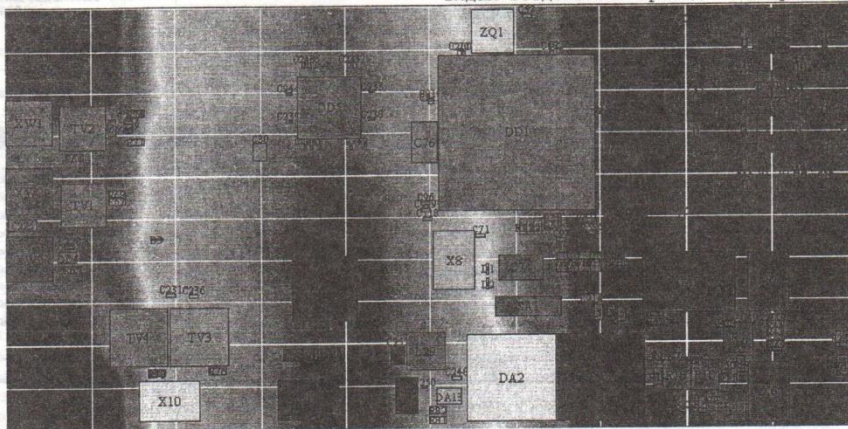


Рис. 6. АСОНИКА-ТМ: Результат расчета модуля PMS-INT (при воздействии акустического шума)

КАРТА МЕХАНИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРИ (при акустическом шуме)

N	ОБЗНАЧЕНИЕ ЭРИ	С	УСКОРЕНИЕ ЭРИ			КОЭФ-ЕНТ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЭРИ, [от.ед.]	ПЕРЕГРУЗКА ЭРИ, [g]
			ЧАСТОТА, [Гц]	МАКСИМАЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ, [g]	МАКСИМАЛЬНОЕ ДОПУСТИМОЕ ПО ТУ, [g]		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	C176	1	250.00	25	40.00	0.625	
2	C177	1	250.00	15	40.00	0.375	
3	C182	1	250.00	25	40.00	0.625	
7	C198	1	5970.00	2	40.00	0.050	
8	C199	1	5970.00	2	40.00	0.050	
26	C1	1	1720.00	16	40.00	0.400	
27	C2	1	5970.00	3	40.00	0.075	
28	C252	1	250.00	24	40.00	0.600	
29	C26	1	1720.00	18	40.00	0.450	
30	C3	1	1720.00	13	40.00	0.325	
35	C118	1	250.00	36	40.00	0.900	
36	C119	1	250.00	37	40.00	0.925	

Рис. 7. Фрагмент выходного файла подсистемы АСОНИКА-ТМ



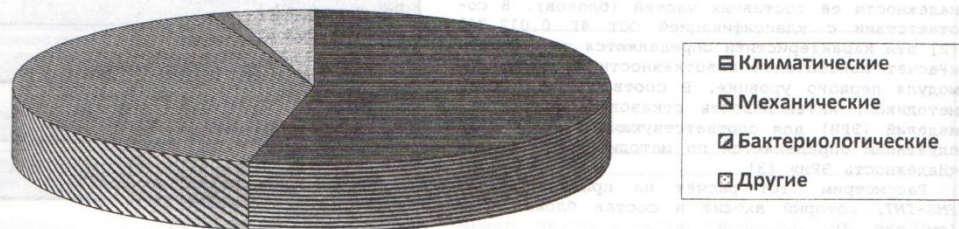


Рис 8. Распределение отказов бортовых комплектов вертолетных систем связи по видам воздействий при эксплуатации

В табл. 2, в качестве примера, приведено распределение отказов бортовых комплектов вертолетных систем связи по механическим факторам.

Таблица 2. Распределение отказов вертолетной аппаратуры связи по механическим факторам

Наименование фактора	% отказов
случайная широкополосная вибрация	41
акустический шум	17
линейное ускорение	9
сейсмический удар	3
механический удар одиночного действия	8
механический удар многократного действия	22

Для непосредственного проведения расчетов по методике [5] применялся модуль «Расчет коэффициента эксплуатации» [6] системы АСОНИКА-К-СЧ (см. рис. 9).

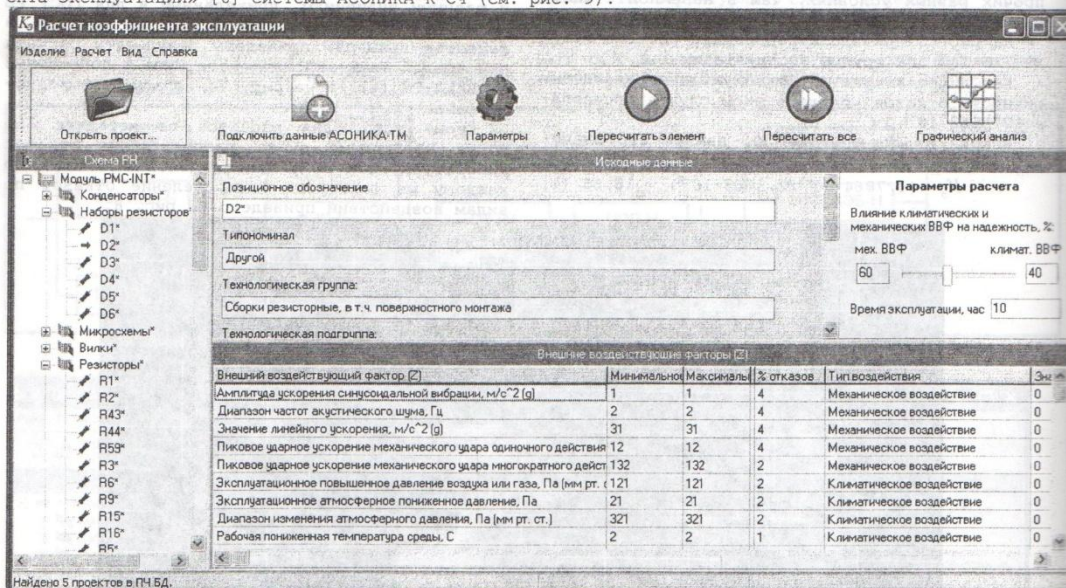


Рис 9. Система АСОНИКА-К-СЧ: Модуль «Расчет коэффициента эксплуатации»

Полученная в результате расчета эксплуатационная интенсивность отказов модуля PSM-INT в этом случае составила  $4,2374 \cdot 10^{-6}$  [ч<sup>-1</sup>].

Исходя из определения  $K_0$  найдем его значения для модуля PMS-INT при дифференцированной оценке влияния ВВФ:

$$K_0 = (4,7864 \cdot 10^{-5} / 4,2374 \cdot 10^{-6}) = 11,29 \quad (2)$$

Сравнение значений  $K_0$  (см. (1) и (2)) показывает, что при дифференцированном учёте влияния ВВФ по методике [5], значение средней наработки в данном примере более чем в 1,6 раз выше, чем при использовании методик [2] и [3].

Кроме того, модуль позволяет оценить степень влияния ВВФ на общий уровень наработки не только по видам воздействий, но по каждому фактору. На рис. 10, в качестве примера, приведено распределение составляющих  $K_0$  модуля PMS-INT по факторам климатического воздействия.

В заключении следует отметить, что использование модуля «Расчет коэффициента эксплуатации»

позволяет проводить расчёты аппаратуры, содержащей ЭРИ не только отечественного, но и иностранного производства, несмотря на то, что ни классификация аппаратуры, ни численные значения ВВФ в [3] и зарубежных справочниках (см., например, [7]) не совпадают, т.к. в этом случае значение  $K_0$  ( $K_0$ ) определяется не по вектору ВВФ, действующему на аппаратуру, а по вектору ВВФ, действующему непосредственно на ЭРИ.

Использование дифференцированной оценки влияния ВВФ в расчётах эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ в итоге даёт значительно меньшую погрешность, чем в случае, когда используется общепринятое допущение о том, что в аппаратуре данной группы для всех ЭРИ одного типоминимала  $K_0 \approx const$  (значения рабочих значений ВВФ в месте установки ЭК принимаются равными значениям ВВФ в месте установки аппаратуры).



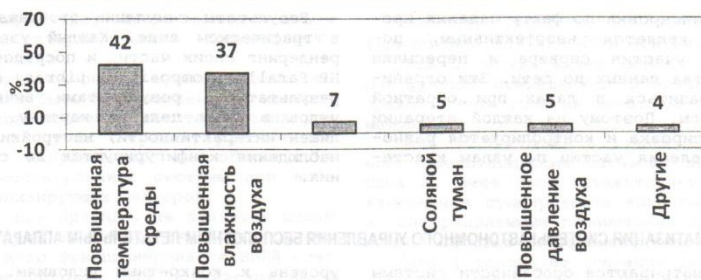


Рис. 10. Распределение составляющих  $K_i$  по факторам климатического воздействия

Кроме того, расширение возможностей в части детального анализа влияния каждого ВВФ на надёжность как ЭРИ, так и аппаратуры в целом, позволяющих научно обосновать необходимость проведения тех или иных мероприятий, направленных

на обеспечение (повышение) надёжности, несомненно, является одним из перспективных направлений дальнейшего совершенствования информационных технологий надёжно-ориентированного проектирования аппаратуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
2. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчёта показателей надёжности.
3. Надёжность ЭРИ: Справочник. / 22 ЦНИИ МО РФ. - М.: МО РФ, 2006. - 641 с.
4. Шалумов, А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий: Том 1. / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, В.В. Жаднов и др. // Под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малюткина, А.С. Шалумова. - М.: Энергоатомиздат, 2007. - 538 с.
5. Жаднов, В.В. Дифференцированная оценка влияния ВВФ при проектных исследованиях надёжности электронных компонентов. / В.В. Жаднов, А.А. Гаршин, И.В. Жаднов. - Электронные компоненты, № 3, 2010.
6. Жаднов, В.В. Методы и средства дифференцированной оценки влияния ВВФ при проектных исследованиях надёжности электронных средств. / В.В. Жаднов, А.А. Гаршин. - Качество. Инновации. Образование, № 4, 2010. - с. 41-55.
7. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment.

Потапкин А. А., Зеленко Л. С.

#### МАСШТАБИРУЕМАЯ СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ НА ГЕРМЕТИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Увеличение габаритов космических аппаратов (КА) и сроков их активного существования на орбите является общей тенденцией в проектировании современных КА, что делает их более уязвимыми при высокоскоростном ударном воздействии техногенных и метеорных частиц. Повреждение обечайки герметичного блока КА вследствие такого воздействия может привести не только к потере герметичности, но и к катастрофическому разрушению силовой конструкции аппарата и отказу КА в целом. В этой связи особую актуальность приобретает разработка мероприятий, направленных на защиту проектируемых КА от воздействия частиц космического мусора, и методов оценки опасности катастрофического разрушения конструкций КА.

Для решения данных задач требуется более точные знания о количественных характеристиках нестационарных явлений при интенсивных нагрузках, которые инициированы процессами физического или химического взрыва и высокоскоростного удара. Эти процессы, в отличие от квазистатических, являются кратковременными и быстропотекающими и сопровождаются образованием ударных волн, волн сжатия и разрежения. Взаимодействие и отражение волн от различных дезориентированных поверхностей и движущихся тел и сред приводит к большим деформациям, локальному перегреву вещества, изменению кристаллической структуры и свойств нагружаемых сред, к множественным разрушениям и другим необратимым эффектам. Поэтому численные методы в задачах физики взрыва и удара в настоящее время являются важным и весьма эффективным инструментом моделирования процессов, протекающих в экстремальных условиях нагружения газов, жидкостей и твердых деформируемых сред.

В качестве численного метода анализа в разрабатываемой системе используется бессеточный метод сплавленных частиц. В алгоритме можно вы-

делять два алгоритмически сложных этапа. Поиск соседних частиц, находящихся на расстоянии взаимодействия, и вычисление производных характеристик частиц. При последовательном подходе к решению перечисленных задач, может потребоваться значительное время для проведения вычислений высокой точности для симуляции разрушения сложной реалистичной конструкции. Увеличение производительности будет возможно либо посредством оптимизации вычислительных алгоритмов, либо совершенствованием технических характеристик микропроцессора и наращивания объема оперативной памяти ЭВМ, на которой проводятся эксперименты. Очевидно, что оба варианта имеют ограничения сверху в плане масштабирования производительности системы.

Эффективным подходом является использование кластеров, которые становятся общедоступными и дешёвыми аппаратными платформами для высокопроизводительных вычислений. Рассматриваемая параллельная вычислительная система проектируется для архитектуры с распределенной памятью. Каждый процессор имеет собственную локальную память, и прямой доступ к этой памяти других процессоров невозможен. Система состоит из нескольких самостоятельных вычислительных узлов. Связь между узлами устанавливается по стандарту MPI (Message Passing Interface).

Перед запуском вычислительного алгоритма сцена разбивается на части, и частицы распределяются между узлами. На каждом узле все множество частиц разделяется на три группы: исходящие, входящие и основные. Зона входящих частиц содержит частицы, которые в данный момент обрабатываются на соседнем узле (находятся в зоне исходящих частиц), но необходимы данному клиенту (узлу) для вычислений на последующих итерациях. По мере развития ударного процесса и перераспределения частиц между узлами, появляется необходимость в выполнении балансировки нагруз-