

А.Н. ПАВЛОВ, Д.А. ПАВЛОВ, А.Б. УМАРОВ, А.В. ГОРДЕЕВ
**МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
КОНФИГУРАЦИЙ МНОГОРЕЖИМНОГО ОБЪЕКТА**

Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б., Гордеев А.В. Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта.

Аннотация. Сложность современных объектов с перестраиваемой структурой приводит к необходимости учета различных факторов взаимодействия их с окружающей средой и связана с увеличением числа входящих в их состав элементов и подсистем, а также, соответственно, стремительным ростом числа внутренних связей, и проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность моделирования и сложность развития. Данные системы функционируют в условиях существенной неопределённости, связанной с изменением содержания целей и задач, стоящих перед объектом, воздействием возмущающих факторов со стороны внешней среды и имеющих целенаправленный и/или нецеленаправленный характер. Указанные аспекты сложности системы связаны не только с неопределёнными воздействиями внешней среды, но и с множеством различных режимов (видов) функционирования, соответствующих множественности решаемых задач и множественности показателей качества их решения. Как правило, системы с фиксированной структурой, настраиваемые обычно на установившийся (какой-то заданный) режим, не обеспечивают наилучшего качества управления в других режимах. Поэтому многорежимность и неопределённость условий функционирования обуславливают необходимость решения проблемы анализа и синтеза конфигурации и реконфигурации рассматриваемых объектов, основанных на интеллектуальных подходах. При этом на этапах создания и проектирования объектов с перестраиваемой структурой должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества режимов функционирования и структур, а также, возможно, внесён такой уровень избыточности в указанные множества с учетом пространственно-временных, технических и технологических ограничений, при которых на этапе их применения по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие структурные изменения объекта. С формальной точки зрения, решение указанных задач возможно в рамках такого важнейшего класса современных научно-технических задач, как задачи многокритериального структурно-функционального синтеза конфигураций многорежимных объектов на различных этапах их жизненного цикла. В настоящей статье приведен метод решения указанных задач, основанный на предложенной авторами концепции параметрического генома сложных многорежимных объектов. Применение данной концепции позволяет в концентрированном виде хранить явные и неявные знания экспертов о взаимодействии элементов и подсистем объекта при выполнении различных вариантов реализации режимов функционирования, а также осуществлять оперативное вычисление значений оптимистических и пессимистических оценок показателей структурно-функциональной надежности однородных/неоднородных, монотонных/немонотонных, равноценных/неравноценных многорежимных объектов. Для решения задачи многокритериального выбора требуемого количества недоминируемых вариантов конфигураций многорежимного объекта, равномерно расположенных в множестве эффективных (паретовских) альтернатив, была предложена комбинация метода интервального лексикографического упорядочения (последовательных уступок) и операторного решающего правила. При этом для проведения детального анализа возможности реализации объектом совместного или раздельного взаимодействия

режимов функционирования с равноценной или неравноценной интенсивностью их применения было предложено нечетко-возможностное представление обобщенного показателя структурно-функциональной надежности в виде трапецевидного числа и определения его центра тяжести. Эффективность использования разработанного метода структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта с перестраиваемой структурой проиллюстрирована на примере решения задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций системы управления движением малого космического аппарата «Аист-2Д».

Ключевые слова: синтез конфигураций, многорежимный объект, многокритериальность, множество недоминируемых альтернатив, параметрический геном.

1. Введение. Как правило, современные сложные объекты с перестраиваемой структурой являются многофункциональными (многорежимными), т.е. предназначены для выполнения нескольких различных целевых задач (функций) [1]. Существенными особенностями функционирования таких многорежимных объектов (МрО) являются организация изменения режимов функционирования, в том числе при больших по уровню деструктивных воздействиях, а также ужесточение требований к обеспечению высококачественного управления при реализации каждого режима с целью достижения конечной цели.

На сегодняшний день довольно большую популярность приобретают направления исследований, ориентируемые на выявление и последующее использование альтернативных (байпасных) путей реализации собственных функций элементами и подсистемами МрО в случае возникновения аномальных (нештатных) ситуаций. Подходы, близкие к данному по идее и содержанию, встречаются в работах ряда иностранных авторов [2 – 9]. Одной из наиболее известных концепций, положенных в основу данных подходов, является концепция FDIR (Fault Detection (Обнаружение (отказов)), Isolation (Локализация) and Recovery (Восстановление)). Разработка инновационных механизмов и их внедрение совместно с уже проверенными методами стандартного FDIR, направленными на увеличение времени работы МрО по назначению и сокращению числа переходов в безопасные режимы, говорят о системном подходе в исследованиях, связанных с указанной концепцией [2 – 9]. В зарубежных источниках встречается целый ряд различных определений механизмов FDIR, однако, как правило, современные FDIR системы решают следующие типовые задачи [2 – 9]: обнаружение неисправностей (отказов, ошибок) в системе; локализация возникшей неисправности и отнесение к конкретному типу, а также определение степени её критичности; поиск наилучших путей устранения неисправности для минимизации негативных

последствий и реализация этих путей. Для осуществления подобных подходов необходимым условием является их дополнение новыми технологиями и методами структурно-параметрического синтеза конфигураций МрО, о которых и идет речь в представленной работе.

Следует отметить, что на этапах проектирования, создания и применения МрО при решении задач оценивания, анализа и синтеза конфигурации и реконфигурации таких объектов требуется учитывать различные варианты задействования динамических режимов функционирования, которые существенным образом влияют на структурно-функциональную надежность и живучесть функциональных элементов (ФЭ), подсистем и в целом всего объекта [10, 11]. При этом в самом общем случае ФЭ проектируемых МрО имеют широкую номенклатурную базу для формирования из них тех или иных конфигураций, а ряд ФЭ обладают узкой номенклатурной базой. Необходимо добавить, что при решении задачи конфигурирования МрО на этапе проектирования и создания требуется учитывать, кроме номенклатурной базы ФЭ, различные ограничения, в том числе возможности создания с их помощью функционального резерва (структурно-функциональной избыточности). Созданный резерв обеспечивает гибкое (проактивное) реагирование на возникающие в будущем нештатные ситуации (расчетные и нерасчетные), вызывающие деградацию и реконфигурацию структур сложного объекта [12, 13] на этапе его применения по целевому назначению (реализации режимов функционирования). Однако следует иметь в виду, что на этапах создания и проектирования МрО зачастую невозможно заранее определить совместность/несовместность, а также интенсивность задействования тех или иных режимов его функционирования, которые могут быть реализованы на этапе применения.

Учитывая все выше сказанное, содержательная формулировка исследуемой в данной статье задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций МрО сводится к следующему. Требуется осуществить многокритериальный выбор (синтез) эффективных вариантов конфигураций МрО с учетом пространственно-временных, технических и технологических ограничений с целью максимизации показателей структурно-функциональной надежности МрО в условиях неопределенных сценариев реализации циклограмм режимов функционирования [14, 15].

Статья организована следующим образом. В разделе 2 приводится описание применения концепции параметрического генома МрО при оценивании показателей структурно-функциональной

надежности MpO для различных сценариев реализации режимов функционирования. Математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций MpO приведена в разделе 3. В разделе 4 приводится описание комбинированного метода, включающего в себя совместное применение метода последовательных уступок и операторного решающего правила, для нахождения требуемого количества недоминируемых конфигураций MpO , равномерно расположенных во множестве Парето. Для детального анализа полученных конфигураций MpO вводится обобщенное описание количественных показателей структурно-функциональной надежности MpO для различных сценариев реализации режимов функционирования в виде нечеткого трапециевидного числа, а также его центроид в качестве интегральной оценки рассматриваемого свойства. В разделе 5 описываются основные результаты решения задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций системы управления движением (СУД) малого космического аппарата (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которая, несомненно, является одной из важнейших подсистем бортового комплекса управления (БКУ) МКА.

2. Применение концепции параметрического генома для оценивания показателей структурно-функциональной надежности многорежимных объектов. Для структурного представления логических условий реализации режимов функционирования MpO предлагается применить общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), а также программный комплекс логико-вероятностного моделирования (ПК ЛВМ) «Арбитр» [16]. С этой целью при построении схемы функциональной целостности (СФЦ) MpO наряду с функциональными вершинами, отражающими работоспособность его ФЭ, введем вершины, характеризующие потребности (интенсивности) реализации рассматриваемых режимов функционирования. При этом под интенсивностью задействования режима функционирования будем понимать отношение суммарного времени задействования режима на рассматриваемом интервале времени к величине этого интервала. Очевидно, что в этом случае возможные значения интенсивностей задействования режимов будут заполнять целиком отрезок единичной длины $[0;1]$. Тогда при сравнении двух режимов будем называть менее (более) интенсивным тот режим, вычисленное значение указанного отношения которого меньше (больше) второго. После чего осуществим расчет вероятностного полинома успешной реализации режимов функционирования MpO с учетом совместного и/или несовместного их задействования [15, 17–19].

Идея использования таких вершин состоит в следующем (рисунок 1).

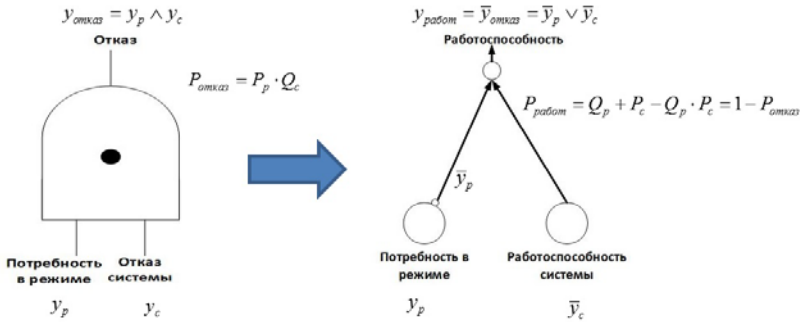


Рис. 1. Фрагмент дерева отказов и СФЦ для режима функционирования

Событие «Отказ выполнения режима» возникает тогда, когда присутствуют события « y_p – есть потребность в режиме» И « y_c – система (объект) не работоспособен», т.е. структурная логическая функция отказа имеет вид $y_{отказ} = y_p \wedge y_c$, а соответствующий полином отказа равен $P_{отказ} = P_p \cdot Q_c$.

Приведем противоположное событие «Режим выполняется (Работоспособен)»: если «Нет потребности в режиме» ИЛИ «Объект работоспособен», которое описывается логической функцией $y_{работ} = \bar{y}_{отказ} = \bar{y}_p \vee \bar{y}_c$, а полином работоспособности равен:

$$\begin{aligned}
 P_{работ} &= Q_p + P_c - Q_p \cdot P_c = P_c + Q_p \cdot Q_c = \\
 &= 1 - Q_c + Q_p \cdot Q_c = 1 - P_p \cdot Q_c = 1 - P_{отказ}
 \end{aligned}$$

С одной стороны, чем меньше потребности в режиме, тем более работоспособен МрО и повышается вероятность выполнения этого режима. С другой стороны, интенсивное задействование режима приводит к уменьшению вероятности безотказной работы (ВБР) ФЭ, участвующих в выполнении этого режима.

Для того чтобы развязать данный замкнутый круг, предлагается применить следующий подход. Введем интенсивность (вероятность) задействования режима функционирования МрО. Тогда под выражением «вероятность режима равна 1» будем понимать, что-либо

в любой момент времени может потребоваться режим либо этот режим постоянно задействуется с интенсивностью 1. Если же режим постоянно задействуется, то вероятность выполнения режима зависит только от ВБР ФЭ МрО, т.к. $Q_p = 0$ и $P_{работ} = P_c \geq 0$. Но если интенсивность режима (вероятность его задействования) уменьшается и стремится к 0 ($P_p \rightarrow 0$), то вероятность выполнения режима также будет иметь подобную зависимость от ВБР ФЭ МрО. Однако значения вероятности выполнения режима будут сдвинуты вверх на Q_p и ее нижняя оценка будет повышаться и стремиться к 1 (т.к. $P_{работ} = Q_p + P_c - Q_p \cdot P_c \geq Q_p = 1 - P_p$). Указанные соображения следует учитывать при дальнейшем исследовании реализации режимов функционирования МрО. При этом необходимо отметить, что отдельные режимы могут быть несовместные (т.е. могут выполняться поочередно) и являются основными, а ряд режимов являются дополнительными и могут осуществляться одновременно с основными режимами. Может встречаться и более сложная взаимосвязь задействования режимов. Поэтому функциональные вершины СФЦ отражают как работоспособность тех или иных ФЭ МрО, так и потребности в реализации тех или иных режимов функционирования МрО.

Пусть вероятностный полином успешной реализации режимов функционирования МрО имеет вид (1):

$$\Re(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}), \quad (1)$$

где $P_i, i = \overline{1, n}$ – вероятности безотказной работы ФЭ МрО, а $P_{n+i}, i = \overline{1, m}$ – интенсивности задействования режимов функционирования МрО. Обозначим интенсивности задействования режимов функционирования МрО через $\alpha_i = P_{n+i}, i = \overline{1, m}$.

Используя введенный авторами параметрический геном структуры [17, 20] МрО $\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^T$, представляющий собой вектор коэффициентов полинома (2) успешной реализации режимов функционирования объекта, состоящего из однородных ФЭ (т.е. $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$),

$$\Re(P, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \dots, \alpha_m)P + \dots + \chi_n(\alpha_1, \dots, \alpha_m)P^n, \quad (2)$$

можно вычислить значения показателей структурно-функциональной надежности однородного и неоднородного МрО по формулам (3):

$$\begin{aligned}
 F_{\text{однор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) &= \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \dots, \alpha_m) dP = \bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T, \\
 F_{\text{неоднор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) &= \int_0^1 \dots \int_0^1 \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) dP_1 dP_2 \dots dP_n = \\
 &= \bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Учитывая тот факт, что режимы функционирования могут быть совместными и/или несовместными, интенсивности их задействования – равноценными и/или неравноценными, а структура взаимосвязей ФЭ МрО однородной или неоднородной, следует воспользоваться подходом, предложенным в работах [17 – 20], для вычисления интегральных показателей структурно-функциональной надежности однородного и неоднородного МрО по формулам (4) – (7):

$$J_{pp} = m \cdot \int_0^{1/m} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha)) d\alpha, \tag{4}$$

$$J_{cp} = \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha)) d\alpha, \tag{5}$$

$$J_{pm} = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \tag{6}$$

$$J_{cm} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \tag{7}$$

где показатели (4) и (5) предназначены для оценивания однородных и неоднородных объектов при несовместном и совместном задействовании равноценных по интенсивности режимов функционирования соответственно, а показатели (6) и (7) – при соответственно несовместном (раздельном) и совместном задействовании неравноценных по интенсивности режимов функционирования. В формулах (4) – (7) в качестве функции F_* могут

быть использованы $F_{однор}$ или $F_{неоднор}$ для соответствующих параметрических геномов $\vec{\chi}_p(\alpha), \vec{\chi}_c(\alpha), \vec{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m), \vec{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ – раздельного задействия равноценных по интенсивности режимов функционирования, совместного задействия равноценных по интенсивности режимов функционирования, раздельного задействия неравноценных по интенсивности режимов функционирования, совместного задействия неравноценных по интенсивности режимов функционирования.

3. Математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций МрО. Предложенные в разделе 2 обобщенные показатели (4) – (7) структурно-функциональной надежности МрО, рассматриваемые в рамках указанных сценариев реализации циклограмм режимов функционирования могут быть использованы при математической постановке решаемой задачи синтеза. Следует отметить, что вычисление значений данных показателей представляет собой трудоемкий процесс. Однако в работе [21] было показано, что в самом общем виде подынтегральное выражение в формулах (4) – (7) можно представить следующим образом (8):

$$F_*(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha_i \alpha_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \sum_{k=j+1}^m \beta_{ijk} \alpha_i \alpha_j \alpha_k + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m. \quad (8)$$

Таким образом, функция $F_*(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m))$ предстает в явном виде как выражение, зависящее от параметров $\alpha_1, \dots, \alpha_m$. При этом коэффициенты $\beta_i, \dots, \beta_{ij}, \dots, \beta_{ijk}, \dots, \beta_{12\dots m}$ одночленов в выражении (8) принимают конкретные значения для рассматриваемой СФЦ при однородном (неоднородном) описании структуры объекта.

Согласно результатам, приведенным в работе [21], для вычисления показателей (4) – (7) можно воспользоваться упрощенными формулами (9) – (12).

$$J_{pp} = \frac{\beta_0}{m^0 \cdot 1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{m \cdot 2} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{m^2 \cdot 3} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{m^m \cdot (m+1)}, \quad (9)$$

$$J_{cp} = \frac{\beta_0}{1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{2} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{3} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{(m+1)}, \quad (10)$$

$$J_{pn} = \frac{\beta_0}{1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{m+1} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{(m+1) \cdot (m+2)} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{(m+1) \cdot (m+2) \cdot \dots \cdot (m+m)}, \quad (11)$$

$$J_{cn} = \frac{\beta_0}{2^0} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{2^1} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{2^2} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{2^m}. \quad (12)$$

Предложенный выше подход также можно применить для определения значимостей ФЭ МрО, которые можно использовать при линеаризации рассматриваемых показателей (4) – (7). Для вычисления значимости i -го ФЭ требуется построить вероятностный полином (13), представляющий собой частную производную от коэффициента готовности (вероятности безотказной работы) объекта по коэффициенту готовности элемента [16, 21]:

$$\begin{aligned} \xi_i(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) &= \frac{\partial \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m)}{\partial P_i} = \\ &= \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) \Big|_{P_i=1} - \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) \Big|_{P_i=0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда каждому полиному $\xi_i(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$ ($\forall i = 1, \dots, n$) сопоставим соответствующие параметрические геномы $\bar{\chi}^i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, используя которые можно вычислять значимости ФЭ МрО по вышеприведенным формулам (9) – (12).

Учитывая концептуальное описание решаемой задачи, перейдем к ее математической постановке. Для построения обобщенной математической модели рассматриваемой задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций МрО предлагается воспользоваться теоретико-множественным подходом [22]. Тогда в качестве основных множеств её элементов и характеристик определим следующие [23]:

$$A = \{A_i, i \in N\}, N = \{1, 2, 3, \dots, n\} - \text{множество ФЭ МрО};$$

$B = \{B_j^i, j \in D^i, D^i = \{1, 2, 3, \dots, k_i\}, i \in N\}$ – номенклатура элементной базы ФЭ, где B_j^i обозначает j-й тип А_i ФЭ МрО, в которой учтена возможная кратность резервирования;

$\mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ – вероятностный полином или вероятностная функция (ВФ) безотказной работы МрО при реализации режимов функционирования, в которой учтены мажоритарное резервирование и совместность их задействования [18,21,24];

$\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \dots, \alpha_m))^T$ – параметрический геном структуры МрО при реализации режимов функционирования;

$\alpha_l, l \in \{1, \dots, m\}$ – интенсивности востребования (задействования) режимов функционирования МрО;

$c_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, k_i\}$ – коэффициенты эффективности потребления ресурсов ФЭ МрО;

$r_{ij}, i \in N, j \in \{1, \dots, m_i\}$ – вероятность безотказной работы ФЭ МрО.

Через $X = \parallel x_{ij} \parallel$ будем обозначать вариант конфигурации проектируемого МрО. Здесь $x_{ij} = 1$ в случае использования элемента B_j^i типа в качестве А_i ФЭ, и $x_{ij} = 0$ в противном случае [25].

Далее будем рассматривать два частных случая:

– *детерминированный*: совместность задействования режимов функционирования учтена при построении ВФ, а интенсивности задействования режимов функционирования МрО заданы [26];

– *недетерминированный*: совместность и интенсивности задействования режимов неизвестны [18 – 21].

Первый частный случай отражает тот факт, что на этапе проектирования многое известно о задействовании режимов функционирования МрО. Тогда в качестве показателя структурно-функциональной надежности МрО при реализации заданных режимов функционирования МрО будем использовать целевую функцию:

$$P_o(X) = \mathfrak{R}\left(\sum_{j=1}^{k_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} p_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\right).$$

Рассмотрение второго случая связано с необходимостью исследования ситуации, когда на этапе проектирования исходных

данных и информации о задействовании режимов функционирования МрО недостаточно. При этом для второго случая предлагается провести исследования следующих крайних частных вариантов: в первом варианте все режимы могут быть задействованы раздельно, во втором варианте – совместно, с одинаковой или различной интенсивностью [18 – 21].

Следует отметить, что раздельное или совместное задействование всех режимов функционирования учитывается при построении ВФ $\mathfrak{R}_{p(c)}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ [16]. Тогда в качестве целевых функций структурно-функциональной надежности МрО при реализации режимов функционирования будем использовать (см. формулы (4), (5)) либо:

$$P_{pp}(X) = m \cdot \int_0^{1/m} \mathfrak{R}_{pp} \left(\sum_{j=1}^{k_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} p_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha \right) d\alpha,$$

если все режимы задействуются раздельно с одинаковой интенсивностью (равноценные режимы), либо:

$$P_{cp}(X) = \int_0^1 \mathfrak{R}_{cp} \left(\sum_{j=1}^{k_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} p_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha \right) d\alpha,$$

при совместном задействовании всех режимов также с одинаковой интенсивностью. При различной интенсивности задействования режимов (неравноценные режимы) в качестве целевых функций структурно-функциональной надежности МрО при реализации режимов функционирования [26] будем использовать (формулы (6), (7)), либо формулу:

$$P_{pn}(X) = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} \mathfrak{R}_{pn} \left(\sum_{j=1}^{k_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} p_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha_1, \dots, \alpha_m \right) d\alpha_1 \dots d\alpha_m,$$

при раздельном задействовании всех режимов, либо формулу следующего вида:

$$P_{cn}(X) = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 \mathfrak{R}_{cn} \left(\sum_{j=1}^{k_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} p_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha_1, \dots, \alpha_m \right) d\alpha_1 \dots d\alpha_m,$$

при совместном их задействовании.

Предложенные целевые функции для второго частного случая $(P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pn}(X), P_{cn}(X))$ позволяют оценить крайние варианты задействования режимов, т.е. дать в некотором смысле пессимистические и оптимистические оценки надежности [27 – 28].

В качестве целевых функций учета ресурсных требований к варианту конфигурации объекта используем формулу следующего

$$\text{вида } C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} \cdot x_{ij} .$$

Важно отметить, что в случае широкой номенклатуры элементной базы для решения рассматриваемой задачи требуется

ввести следующие ограничения: $\sum_{j=1}^{k_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N$, содержание которых

состоят в том, что в МрО в качестве A_i ФЭ используется какой-то элемент B_j^i типа из его номенклатуры.

В противоположном случае, то есть для узкой номенклатуры,

указанное неравенство $\sum_{j=1}^{k_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N$ будет обозначать, что

максимальная кратность резервирования A_i ФЭ МрО не более k_i и $x_{ij} = 1$ при j - кратном дублировании A_i ФЭ.

При этом:

$$p_{i1} = p_i, p_{i2} = 1 - (1 - p_i)^2, \dots, p_{ik_i} = 1 - (1 - p_i)^{k_i}, \forall i \in N,$$

$$g_{i1} = g_i, g_{i2} = 2g_i, \dots, g_{ik_i} = k_i g_i, \forall i \in N, \text{ и}$$

$$c_{i1} = c_i, c_{i2} = 2c_i, \dots, c_{im_i} = m_i c_i, \forall i \in N.$$

Таким образом, получаем область Δ допустимых вариантов конфигурации МрО, задаваемую неявно с помощью вышеуказанных ограничений.

Учитывая всё вышесказанное, можно утверждать, что задача структурно-параметрического синтеза конфигураций МрО сводится к решению следующих многокритериальных задач выбора [29, 30].

Для первого частного случая:

$$\min_{X \in \Delta} C(X), \max_{X \in \Delta} P_0(X) . \quad (14)$$

Для второго частного случая:

$$\min_{X \in \Delta} C(X), \max_{X \in \Delta} P_{pp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{pn}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cn}(X). \quad (15)$$

Иначе говоря, требуется найти недоминируемые (паретовские) варианты конфигураций $\text{MrO } \Delta^{nd} \subseteq \Delta$, удовлетворяющие следующим критериям оптимальности: при минимальном ресурсопотреблении MrO обеспечить максимально возможные значения показателей структурно-функциональной надежности MrO реализации режимов функционирования для детерминированных условий их использования [31 – 33] (частный случай 1, задача (14)), для неопределенных условий задействования режимов (частный случай 2, задача (15)).

Следует отметить, что одна из главных особенностей задач многокритериального выбора (в частности задач (14), (15)) состоит в том, что данные задачи не являются корректными в рамках аксиоматики, принятой в классической теории оптимизации и принятия решения [25, 29, 31–34]. Действительно, на основе различных критериев оптимизации получаются различные решения, не совпадающие в общем случае друг с другом, что приводит к появлению в задачах принятия решений специфического вида неопределенности – *критериальной неопределенности*. Для снятия указанной неопределенности необходимо использовать методы многокритериального выбора, основу которых составляет доопределение (уточнение) задачи путем привлечения дополнительной качественной и количественной информации от лица, принимающего решение (ЛПР). Как правило, эта информация касается свойств критериальных функций, свойств множества альтернатив и достигается введением некоторых аксиом (принципов оптимальности) о том, что следует понимать под оптимальным (рациональным, недоминируемым) в целом решением в этой неопределенной ситуации.

4. Комбинированный метод решения поставленных задач.

Трудности решения приведенных многокритериальных задач выбора на дискретном допустимом множестве вариантов конфигураций MrO вызваны наличием как критериальной неопределенности, так и нелинейностью целевых функций $P_o(X), P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pn}(X), P_{cn}(X)$.

В работе [19] проведен анализ задачи (14), и в качестве способа преодоления критериальной неопределенности был обоснованно предложен интервальный лексикографический метод решения многокритериальной задачи. При этом для случая, когда вероятностная функция

$P_o(X) = \Re(\sum_{j=1}^{k_1} P_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} P_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} P_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ безотказной

работы МрО при реализации режимов функционирования описывает монотонную структуру МрО, её можно заменить линейным аналогом

следующего вида $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij} \cdot x_{ij}$, которое интерпретируется как

суммарное приращение ВБР МрО в результате использования конкретно взятых элементов при проектировании МрО. Здесь величины $\mu_{ij} = \tilde{\xi}_i \cdot p_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, k_i\}$ характеризуют вклад в соответствующий обобщенный показатель структурно-функциональной надежности при использовании в проекте А₁ФЭ МрО В_jⁱ – го типа, $\tilde{\xi}_i, i \in N$ – структурная значимость ФЭ МрО при реализации режимов функционирования, вычисляемая по формуле

$$\tilde{\xi}_i = \xi_i \left(\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2}, \alpha_1, \dots, \alpha_m \right) = \bar{\chi}^i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right)^T, i \in N.$$

Основным этапом решения рассматриваемых задач является нахождение эффективных (удовлетворяющих заявленным требованиям и ограничениям) вариантов разрабатываемого МрО, которые распределены равномерно в области недоминируемых альтернатив (Парето). Для реализации данного этапа необходимо найти $P_i^{\min} = \min_{j \in \{1, 2, \dots, k_i\}} P_{ij}, P_i^{\max} = \max_{j \in \{1, 2, \dots, k_i\}} P_{ij}, \forall i \in N$ и соответствующие

им варианты конфигураций МрО $X^{\min} = \left\| x_{ij}^{\min} \right\|, X^{\max} = \left\| x_{ij}^{\max} \right\|$. Для

данных вариантов можно вычислить соответственно минимальное и максимальное значение вероятностной функции

$$P_o(X) = \Re\left(\sum_{j=1}^{k_1} P_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{k_2} P_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{k_n} P_{nj} \cdot x_{nj}, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\right), \text{ а именно}$$

$$P_{\min} = P_o(X^{\min}), P_{\max} = P_o(X^{\max}).$$

Используя полученные решения (альтернативы) конфигураций МрО, вычислим соответствующие им значения показателей ресурсопотребления $C^1 = C(X^{\min}), C^2 = C(X^{\max})$. Так как окончательное решение по выбору варианта конфигураций МрО за ЛППР, то им может быть указано необходимое количество недоминируемых альтернатив, которые должны быть представлены для последующего анализа [33]. Для того чтобы из всего множества недоминируемых альтернатив выделить заданное количество $k_{\text{зад}}$

эффективных решений, равномерно расположенных в области Парето, предлагается применить следующий подход, основанный на методе уступок.

Вычисляем уступки ΔC по целевому показателю ресурсопотребления. Так как данный показатель в решаемой задаче требуется минимизировать, то находим его минимальное значение и соответствующую уступку $C_{\min} = \min\{C^1, C^2\}, \Delta C = \frac{|C^2 - C^1|}{k_{\text{зад}} - 1}$.

Тогда остается решить серию задач линейного булева программирования следующего вида:

$$\max_{X \in \Delta_l} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{k_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N, \quad (17)$$

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} \cdot x_{ij} \leq C_{\min} + l \cdot \Delta C, \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in N, j \in \{1, \dots, k_i\} \quad (19)$$

При этом $l = 1, \dots, k_{\text{зад}} - 1$. Здесь Δ_l – множество допустимых решений для заданной уступки $l \cdot \Delta C$ по целевой функции

$$\text{ресурсопотребления } C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} \cdot x_{ij}.$$

Данный прием предлагается также использовать для решения задачи (15) при реализации режимов функционирования МрО. Однако, кроме одного критерия $\max_{X \in \Delta} P_o(X)$ структурно-функциональной надежности МрО при реализации режимов функционирования, следует учитывать следующие четыре критерия оптимальности $\max_{X \in \Delta} P_{pp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{pn}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cn}(X)$. При этом для вычисления структурной значимости ФЭ МрО $\tilde{\xi}_i^{pp}, \tilde{\xi}_i^{cp}, \tilde{\xi}_i^{pn}, \tilde{\xi}_i^{cn}$ при реализации режимов функционирования в случае раздельного и совместного задействования равноценных или неравноценных

режимов функционирования [21] следует использовать соответственно формулы (9), (10), (11), (12). Тогда при линеаризации целевых функций $P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pn}(X), P_{cn}(X)$ целесообразно применить соответственно следующие получившиеся линеаризованные целевые функции $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{pp} \cdot x_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{cp} \cdot x_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{pn} \cdot x_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{cn} \cdot x_{ij}$. Причем вклады в обобщенный показатель структурно-функциональной надежности MrO вычисляются следующим образом:

$$\mu_{ij}^{pp} = \tilde{\xi}_i^{pp} \cdot p_{ij}, \mu_{ij}^{cp} = \tilde{\xi}_i^{cp} \cdot p_{ij}, \mu_{ij}^{pn} = \tilde{\xi}_i^{pn} \cdot p_{ij}, \mu_{ij}^{cn} = \tilde{\xi}_i^{cn} \cdot p_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, k_i\}.$$

Для преодоления критериальной неопределенности, вызванной использованием критериев $\max_{X \in \Delta} P_{pp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{pn}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cn}(X)$, предлагается «доопределить» решаемую задачу. Для этого целесообразно применить операторное решающее правило [34]: «оптимальное решение минимизирует общую верхнюю грань относительных отклонений от оптимальных решений по частным показателям». Необходимость применения данного операторного правила возникает по нескольким причинам. Во-первых, при выборе варианта конфигурации MrO используемые целевые функции $P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pn}(X), P_{cn}(X)$ имеют одинаковый приоритет. Во-вторых, так как MrO монотонен, то значимости ФЭ принимают неотрицательные значения ($\tilde{\xi}_i^{pp} \geq 0, \tilde{\xi}_i^{cp} \geq 0, \tilde{\xi}_i^{pn} \geq 0, \tilde{\xi}_i^{cn} \geq 0, i \in N$). В этом случае в области Δ допустимых вариантов конфигураций MrO нетрудно найти наибольшие значения указанных целевых функций.

Действительно,

$$P_{pp}^{\max} = \sum_{i=1}^n \tilde{\xi}_i^{pp} \cdot \max_{j \in \{1, 2, \dots, k_i\}} p_{ij}, P_{cp}^{\max} = \sum_{i=1}^n \tilde{\xi}_i^{cp} \cdot \max_{j \in \{1, 2, \dots, k_i\}} p_{ij},$$

$$P_{pn}^{\max} = \sum_{i=1}^n \tilde{\xi}_i^{pn} \cdot \max_{j \in \{1, 2, \dots, k_i\}} p_{ij}, P_{cn}^{\max} = \sum_{i=1}^n \tilde{\xi}_i^{cn} \cdot \max_{j \in \{1, 2, \dots, k_i\}} p_{ij}.$$

Получаем, что основной этап при решении задачи (15) связан непосредственно с решением задач линейного булева программирования вида (20)-(27). Суть данного этапа решения исследуемой задачи многокритериального выбора заключается в нахождении эффективного решения из области Δ_1 , доставляющего наименьшую общую верхнюю грань относительных отклонений от оптимальных решений по частным показателям.

$$w \rightarrow \min_{\Delta_i}, \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{pp} \cdot x_{ij} \geq (1-w) \cdot P_{pp}^{\max}, \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{cp} \cdot x_{ij} \geq (1-w) \cdot P_{cp}^{\max}, \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{pn} \cdot x_{ij} \geq (1-w) \cdot P_{pn}^{\max}, \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \mu_{ij}^{cn} \cdot x_{ij} \geq (1-w) \cdot P_{cn}^{\max}, \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^{k_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N, \quad (25)$$

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} \cdot x_{ij} \leq C_{\min} + l \cdot \Delta C, \quad (26)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, j \in \{1, \dots, k_i\}. \quad (27)$$

Для детального анализа полученных конфигураций МрО [29] вводится обобщенное описание количественных показателей структурно-функциональной надежности МрО в рамках рассматриваемых сценариев реализации режимов функционирования в виде нечеткого трапециевидного числа с параметрами $Z = (z_1, z_2, z_3, z_4)$, функция принадлежности которого задается следующим образом [35]:

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} \frac{x - z_1}{z_2 - z_1}, & \text{если } z_1 \leq x \leq z_2 \\ 1, & \text{если } z_2 \leq x \leq z_3 \\ \frac{z_4 - x}{z_4 - z_3}, & \text{если } z_3 \leq x \leq z_4 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Для нахождения параметров нечеткого числа $Z = (z_1, z_2, z_3, z_4)$ будем использовать полученные значения целевых функций $P_o(X), P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pm}(X), P_{cn}(X)$ – вероятностей безотказной работы МрО при выполнении заданных сценариев реализации режимов функционирования. В качестве параметра z_1 будет служить нижняя оценка обобщенного показателя структурно-функциональной надежности МрО (пессимистическая оценка), которая вычисляется при условии совместного задействования равноценных по интенсивности режимов функционирования на всем рассматриваемом интервале времени. Два других параметра z_2, z_3 являются соответственно минимальным и максимальным значениями среди показателей структурно-функциональной надежности при задействовании несовместных равноценных и неравноценных режимов. Четвертым параметром z_4 будет служить значение показателя структурно-функциональной надежности объекта при несовместном задействовании равноценных по интенсивности режимов функционирования (оптимистический вариант).

В качестве интегральной оценки показателя структурно-функциональной надежности [27, 31, 32, 36, 37] варианта конфигурации МрО целесообразно принять центр тяжести (центроид, показатель деффазификации) полученного трапециевидного числа по формуле (28):

$$C_{\text{тяж}} = \frac{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_1)(z_4 - z_3) - \frac{1}{3}(z_2 - z_1)^2 - \frac{2}{3}(z_4 - z_3)^2}{z_3 - z_2 + z_4 - z_1} + z_1, \quad (28)$$

где z_1, z_2, z_3, z_4 – описанные выше параметры трапеции.

Предложенный комбинированный метод решения рассматриваемой задачи и интегральные оценки обобщенного

показателя структурно-функциональной надежности конфигураций МрО проиллюстрируем на примере решения задачи многокритериального структурно-параметрического синтеза конфигураций СУД МКА ДЗЗ.

5. Расчетный пример решения задачи структурно-параметрического синтеза конфигураций системы управления движением малого космического аппарата. Рассмотрим СУД МКА ДЗЗ «Аист-2Д». В качестве датчиков первичной информации СУД МКА «Аист-2Д» [38, 39] привлекаются: одноосные измерители угловой скорости (ОИУС), 4 шт.; оптические солнечные датчики (ОСД), 2 шт.; звездные датчики (ЗД), 2 шт.; приборы ориентации по Земле (ПОЗ), 2 шт. Пусть оси ОИУС имеют кубическую конфигурацию («Куб»), когда три измерителя угловой скорости сонаправлены с осями МКА, а четвертый – по диагонали куба [10]. Проведем исследование СУД МКА ДЗЗ с учетом следующих режимов [38]: сброса кинетического момента (СКМ); одноосной солнечной ориентации (ОСО); трёхосной ориентации в орбитальной системе координат (ОСК); целевой режим ориентации МКА (ЦО), предназначенный для съёмки заданной области (объекта наблюдения). Схема функциональной целостности ФЭ СУД МКА при выполнении указанных выше режимов ориентации представлена на рисунке 2.

Основные функциональные вершины СФЦ отражают: 1, 2, 3 и 4 – работоспособность ОИУС₁, ОИУС₂, ОИУС₃ и ОИУС₄ соответственно, 5 – работоспособность ОСД₁, 6 – работоспособность ОСД₂, 7 – работоспособность ПОЗ₁, 8 – работоспособность ПОЗ₂, 9 – работоспособность ЗД₁, 10 – работоспособность ЗД₂, 11 – потребность в режиме СКМ, 12 – потребность в режиме ОСО, 13 – потребность в режиме ОСК, 14 – потребность в режиме ЦО. Вершины 15–34 являются фиктивными и описывают реальные логические взаимосвязи элементов СУД МКА.

Используя программный комплекс логико – вероятностного моделирования «Арбитр» [16], получим для СФЦ СУД МКА два вероятностных полинома успешного его функционирования $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}), \mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14})$, где $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14})$ – вероятностная функция проведения успешной ориентации МКА СУД для режимов, не являющихся группой несовместных событий (ГНС); $\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14})$ – вероятностная функция проведения успешной ориентации МКА СУД для режимов, представляющих ГНС; $P_i, i = \overline{1, 10}$ – вероятности безотказной работы

ФЭ СУДН а $P_{10+i}, i = \overline{1,4}$ – интенсивности (вероятности) реализации режимов ориентации СУД.

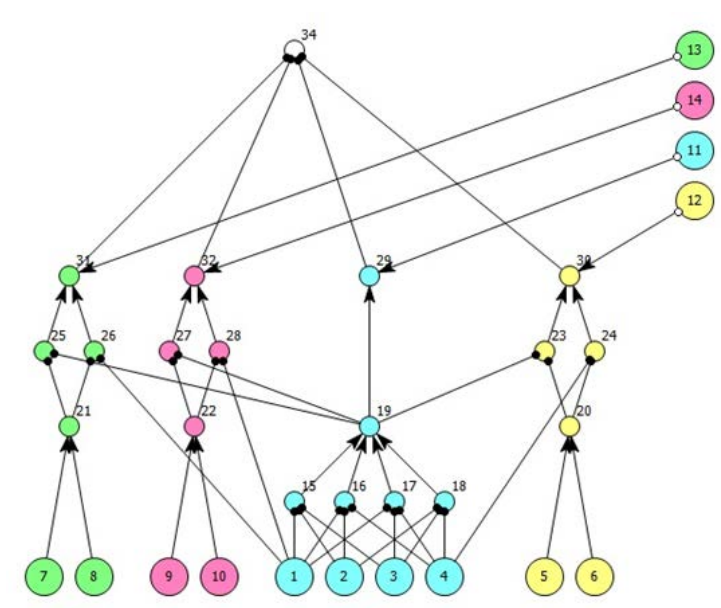


Рис. 2. СФЦ датчиков СУД для конфигурации «Куб»

Номенклатура ФЭ, используемая в решаемой задаче, и исходные данные по ним приведены в таблицах 1 – 3.

Таблица 1. Исходные данные по значениям показателей надежности элементов

ФЭ	1	2	3	4	5	6
1	0,955	0,884	0,963	-	-	-
2	0,955	0,884	0,963	-	-	-
3	0,973	0,811	0,915	0,915	0,915	0,969
4	0,973	0,811	0,915	0,915	0,915	0,969
5	0,973	0,811	0,915	0,915	0,915	0,969
6	0,973	0,811	0,915	0,915	0,915	0,969
7	0,957	0,971	0,921	-	-	-
8	0,957	0,971	0,921	-	-	-
9	0,95	0,949	0,985	0,998	-	-
10	0,993	0,993	0,889	0,999	-	-

Таблица 2. Исходные данные по энергопотреблению элементов

ФЭ	1	2	3	4	5	6
1	11	8	20	-	-	-
2	11	8	20	-	-	-
3	15	15	15	18	11	14
4	15	15	15	18	11	14
5	15	15	15	18	11	14
6	15	15	15	18	11	14
7	4,5	0,5	6	-	-	-
8	4,5	0,5	6	-	-	-
9	16,5	25	20	75	-	-
10	52	25	30	130	-	-

Таблица 3. Исходные данные по весовым характеристикам элементов

ФЭ	1	2	3	4	5	6
1	10	1,8	6	-	-	-
2	10	1,8	6	-	-	-
3	3,3	4,3	4,3	4,8	2	3,2
4	3,3	4,3	4,3	4,8	2	3,2
5	3,3	4,3	4,3	4,8	2	3,2
6	3,3	4,3	4,3	4,8	2	3,2
7	1,6	3,5	0,7	-	-	-
8	1,6	3,5	0,7	-	-	-
9	6	6	9	55	-	-
10	12	8,8	10	9,5	-	-

Результаты многокритериального структурно-параметрического синтеза эффективных конфигураций СУД МКА (рисунок 2) приведены в таблице 4.

Кроме того, в таблице 5 представлены значения обобщенного показателя структурно-функциональной надежности для каждого из полученных недоминируемых вариантов конфигураций исследуемой системы при реализации всех режимов ориентации, максимально задействованных на всем рассматриваемом интервале времени совместно (пессимистический вариант) – нижняя оценка показателя структурно-функциональной надежности, а также оценки при реализации отдельно взятых режимов.

Таблица 4. Эффективные (паретовские) варианты конфигураций СУД МКА

Вариант	ФЭ										Масса	Энергопотреб-ление	ГНС равн	ГНС неравн	Без ГНС равн	Без ГНС неравн
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
1	2	2	-	5	-	-	1	2	-	-	10,7	32	0,399482	0,399482	0,129626	0,154138
2	1	-	5	5	-	-	2	2	-	-	21	34	0,438437	0,438437	0,142896	0,170175
3	1	2	-	6	-	-	2	2	-	-	22	34	0,443062	0,443062	0,144822	0,17264
4	2	2	5	1	-	-	3	3	-	-	10,3	54	0,482865	0,482865	0,16056	0,192514
5	2	2	6	1	5	5	2	2	-	-	21,1	68	0,735073	0,735073	0,365407	0,454431
6	1	2	5	1	5	5	2	2	-	-	28,1	68	0,738146	0,738146	0,366828	0,456224
7	2	2	6	6	5	5	3	3	1	-	21,4	94,5	0,966004	0,966004	0,937706	0,943726
8	3	2	1	1	5	5	2	2	1	-	31,4	97,5	0,978241	0,978241	0,953693	0,959284
9	3	1	6	6	6	5	2	2	1	-	40,6	101,5	0,98209	0,98209	0,960545	0,965582
10	2	2	1	1	5	5	1	1	1	2	32,2	118,5	0,980351	0,980351	0,971853	0,973115
11	1	1	1	1	1	6	2	2	3	-	49,1	102	0,991114	0,991114	0,983308	0,984998
12	3	2	1	1	1	1	2	2	1	2	42,8	130,5	0,992195	0,992195	0,988229	0,988814
13	3	3	6	1	6	6	1	1	1	2	42,9	147,5	0,995271	0,995271	0,992662	0,993115
14	3	1	6	1	6	6	2	2	3	2	53,7	134	0,995215	0,995215	0,992865	0,993234
15	3	1	1	1	1	6	2	2	3	2	53,9	136	0,995441	0,995441	0,993259	0,993598
16	3	3	1	1	1	1	2	2	3	2	50	146	0,995829	0,995829	0,993884	0,994186
17	3	3	1	1	1	1	2	2	3	4	50,7	251	0,995852	0,995852	0,993939	0,994233
18	3	3	1	1	1	1	2	2	4	2	96	201	0,995852	0,995852	0,99394	0,994234
19	3	3	1	1	1	1	2	2	4	4	96,7	306	0,995855	0,995855	0,993947	0,99424

Таблица 5. Оценки структурно-функциональной надежности недоминируемых вариантов конфигураций СУД МКА

Вариант	Нижняя оценка	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим
1	0	0,715032	0	0,845988	0
2	0	0,79955	0	0,927305	0
3	0	0,818049	0	0,927305	0
4	0	0,962251	0	0,904889	0
5	0	0,974166	0,986268	0,954965	0
6	0	0,976325	0,986676	0,962691	0
7	0,912201803	0,973275	0,985304	0,909848	0,931271
8	0,930464106	0,987394	0,988173	0,966013	0,944267
9	0,939740964	0,992649	0,994	0,968223	0,946369
10	0,965876331	0,975049	0,986351	0,94289	0,980738
11	0,976200391	0,992731	0,996125	0,967956	0,98075
12	0,985499574	0,987394	0,994639	0,966013	0,993618
13	0,990643636	0,993781	0,996304	0,955123	0,996245
14	0,991175436	0,993068	0,996103	0,96836	0,996211
15	0,991703245	0,993474	0,996326	0,968498	0,996348
16	0,992494307	0,994159	0,996636	0,968778	0,996628
17	0,992583641	0,994159	0,996636	0,968778	0,996718
18	0,992584634	0,994159	0,996636	0,968778	0,996719
19	0,992596545	0,994159	0,996636	0,968778	0,996731

В таблице 6 представлены результаты вычисления нечеткого трапециевидного числа и центры тяжести полученных трапеций, однозначно характеризующих итоговый показатель структурно-функциональной надежности каждого из вариантов конфигураций СУД МКА.

Таблица 6. Показатели структурно-функциональной надежности вариантов конфигураций в виде нечеткого трапециевидного числа

Вариант	Трапециевидная интегральная оценка				Центр тяжести
	z_1	z_2	z_3	z_4	
1	0	0,129626	0,154138	0,399482	0,17934
2	0	0,142896	0,170175	0,438437	0,1971
3	0	0,144822	0,17264	0,443062	0,199361
4	0	0,16056	0,192514	0,482865	0,218458
5	0	0,365407	0,454431	0,735073	0,38319
6	0	0,366828	0,456224	0,738146	0,384753
7	0,912202	0,937706	0,943726	0,966004	0,939695
8	0,930464	0,953693	0,959284	0,978241	0,955139
9	0,939741	0,960545	0,965582	0,98209	0,961708
10	0,965876	0,971853	0,973115	0,980351	0,972887
11	0,9762	0,983308	0,984998	0,991114	0,983839
12	0,9855	0,988229	0,988814	0,992195	0,98873
13	0,990644	0,992662	0,993115	0,995271	0,992932
14	0,991175	0,992865	0,993234	0,995215	0,993143
15	0,991703	0,993259	0,993598	0,995441	0,99352
16	0,992494	0,993884	0,994186	0,995829	0,994116
17	0,992584	0,993939	0,994233	0,995852	0,99417
18	0,992585	0,99394	0,994234	0,995852	0,994171
19	0,992597	0,993947	0,99424	0,995855	0,994178

Поясним, каким образом результаты, полученные при использовании предложенного метода, позволяют, по сравнению с существующими подходами, провести более детальный анализ вариантов конфигураций СУД МКА. Так, если оценивать варианты конфигураций с позиции классической теории надежности, то первые шесть вариантов неразличимы. Однако оценки этих вариантов, полученные с применением предложенного метода, имеют явное различие: применение первых четырех вариантов конфигураций СУД МКА позволяют выполнять 1 и 3 режимы ориентации, применение 5 и 6 вариантов – 1, 2 и 3 режимы ориентации.

Прокомментируем один из полученных недоминируемых вариантов конфигураций исследуемой СУД МКА под номером 13. Указанный вариант рассматриваемой системы характеризуется тремя основными показателями: суммарная масса, энергопотребление и надежность. Масса варианта №13 составляет 42,9. Энергопотребление – 147,5. В таблицах 4-5 представлены значения обобщенного показателя структурно-функциональной надежности системы для различных случаев задействования режимов ориентации, а также вероятности реализации системой отдельно взятых режимов. Наконец, итоговым значением показателя надежности указанного варианта, высчитываемого как центр тяжести нечеткого трапециевидного числа, является значение 0,992932.

Структурно вариант №13 включает в себя первые два элемента типа №3; третий, пятый и шестой элементы типа №6; десятый ФЭ типа №2; остальные элементы выбраны типа №1.

Выбор конкретного варианта конфигурации рассматриваемой системы из множества недоминируемых вариантов осуществляется ЛПР в интерактивном режиме. Для этого ЛПР указывает дополнительную информацию в виде допустимых значений на ограничения массы, энергопотребления и/или надежности.

6. Заключение. В настоящей работе представлен метод структурно-параметрического синтеза конфигураций MrO для формирования требуемого множества эффективных вариантов его конфигураций, равномерно расположенных в множестве компромиссов (множестве Парето), в основе которого лежит концепция параметрического генома структуры MrO, совместное применение метода последовательных уступок и операторного решающего правила, а также интегральные оценки показателей структурно-функциональной надежности MrO для рассматриваемых сценариев реализации режимов функционирования.

Практическая реализация метода структурно-параметрического синтеза конфигураций MrO показала:

– параметрический геном структуры MrO позволяет в концентрированном виде хранить явные и неявные знания экспертов о взаимодействии элементов и подсистем объекта при выполнении различных комбинаций реализации режимов функционирования, определять оптимистические, пессимистические и промежуточные оценки показателей структурно-функциональной надежности однородных и неоднородных MrO, показателей значимости и вкладов отдельных ФЭ в обобщенный показатель структурно-функциональной надежности как монотонных, так и немонотонных MrO;

– разработанный комбинированный метод позволяет преодолеть критериальную неопределенность и сформировать требуемое множество эффективных решений, равномерно расположенное в области компромиссов;

– приведенные аналитические выражения для вычисления интегральных показателей структурно-функциональной надежности МрО в условиях неизвестной циклограммы режимов его функционирования дают возможность выполнять оперативные вычисления (с минимальным объемом оперативной памяти) указанных показателей и решать поставленную в статье задачу даже на бортовом интеллектуальном вычислительном комплексе МКА;

– выбор конфигураций МрО существенно зависит от вариантов задействования режимов его функционирования – совместного либо раздельного, а также равноценности данных режимов.

Литература

1. Балухто А.Н., Романов А.А. Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы развития // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Том 6. №1. С. 65–75.
2. Mikaelyan L., Müller S., Gerndt A., Noll T. Synthesizing and Optimizing FDIR Recovery Strategies from Fault Trees // Formal Techniques for Safety-Critical Systems. FTSCS 2018. Communications in Computer and Information Science. / Artho C., Ölveczky P. (eds). Springer, Cham. 2019. vol. 1008. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12988-0_3
3. Tiplaldi M., Glielmo L. A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft // IEEE Systems Journal. 2018. vol. 12. Issue 4. pp. 3893–3905.
4. Lianxiang J., Peipei X., Xuyang F. Software Reconfiguration Technology for Serviceable Satellite OBDH System // Proceedings of the Second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), Harbin. 2017. pp. 100–104.
5. Amigoni F., Ferrari Dacrema M., Donati A., Laroque C., Lavagna M., Riva A. Aggregating Models for Anomaly Detection in Space Systems: Results from the FCTMAS Study // Intelligent Autonomous Systems 15. IAS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Strand / Dillmann R., Menegatti E., Ghidoni S. (eds). 2019. vol. 867. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01370-7_12.
6. Wang D.-Y., Tu Y.-Y., Liu C.-R., He Y.-Z., Li W.-B. Connotation and Research of Reconfigurability for Spacecraft Control Systems: A Review // Acta Automatica Sinica. 2017. vol. 43. no. 10. pp. 1687–1702.
7. Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S.Y. Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies // International Journal of Production Research. 2016. vol. 54. no. 23. pp. 6969–6983.
8. Theorin A. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // International Journal of Production Research. 2016. pp. 1297–1311.

9. Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production // *International Journal of Production Research*. 2017. vol. 55. no. 5. pp. 1368–1385.
10. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации: учебное пособие // М-во образования и науки Российской Федерации, Томский гос. ун-т, ОАО "Газпром космические системы". Томск: Изд. дом Томского гос. ун-та. 2015. 265 с.
11. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О., Виноградов В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // *Надежность – 2018*. Т. 18. №2. 2018. С. 17 – 24.
12. Mehdi Jafari. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // *Aerospace Science and Technology*. vol. 47. 2015. pp. 467-472
13. Райкунова Г.Г. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов // М.: Физматлит. 2013. 256 с.
14. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М.: Наука. 1979. 232 с.
15. Куренков В.И., Капитонов В.А. Методы расчёта и обеспечения надёжности ракетно-космических комплексов: учебное пособие // Самара: изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета. 2007. 320 с.
16. Поленин В. И., Рябинин И. А., Свирин С. К., Гладкова И. А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография, научное издание // под ред. А. С. Можаяева. СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.
17. Павлов А. Н., Воротягин В. Н., Кулаков А. Ю., Умаров А. Б. Исследование структурно-функциональной надёжности малых космических аппаратов при решении задач ориентации // *Информатизация и связь*. М.: Автономная некоммерческая организация "Редакция журнала "Информатизация и связь". 2020. №4. С. 156–164.
18. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // *Труды МАИ*. 2021. №120. С. 1–29.
19. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations // *Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020)*. St. Petersburg, Russian Federation, Dec. 11-12, 2020. CEUR-WS 2021. 2021. vol. 2803. pp. 61-66.
20. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Алешин Е.Н., Воротягин В.Н., Умаров А.Б. Моделирование и анализ структурно-функциональной надежности сложных многорежимных объектов // *Труды ВКА имени А.Ф. Можайского*. 2021. №677. С. 186-194.
21. Pavlov A.N., Umarov A.B., Aleshin Ye.N. Study of the structural significance of supply chain elements with variable order rate // *Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021*. CEUR-WS 2021. 2021. vol-2924. pp. 1-8
22. Филатов А.В., Ткаченко И.С., Тюгашев Е.В., Сопченко Е.В. Математическое обеспечение системы управления движением МКА // *Информационные технологии и нанотехнологии*. Материалы Международной конференции и молодежной школы. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный

- аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (Национальный исследовательский университет)», Самара. 2015. С. 290-294.
23. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности // Труды МАИ. 2019. №108. DOI: 10.34759/trd-2019-108-16.
 24. Manuilov Yu.S., Pavlov D.A., Pavlov A.N., Slin'ko A.A. The Technique of Informational Interaction Structural-parametric Optimization of a Earth's Remote sensing Small Spacecraft Cluster // Springer International Publishing, Switzerland. 2018. vol. 3: Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems. pp. 155-166.
 25. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений // М.: Наука. 2006. 181 с.
 26. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. №58. 12 с.
 27. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. 1990.
 28. Колодежный Л.П., Черномаров А.В. Надежность и техническая диагностика // М.: Изд. ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. 2010. 452 с.
 29. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач // М.: Наука. 1982. 254 с.
 30. Калинов М.И., Родионов В.А. Обоснование выбора рационального варианта применения малых космических аппаратов при отказах отдельных элементов их бортовых систем // IX всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2019), 2019. С. 434-438.
 31. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения // М.: Радио и связь. 1981. 560 с.
 32. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход // М.: Физматлит. 2005. 176 с.
 33. Ногин В.Д. Проблемы сужения множества Парето: подходы к решению // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 1. С. 98–112.
 34. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник // СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2014. 383 с.
 35. Pavlov A., Ivanov D., Dolgui A., Sokolov V. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach to Supply Chain Resilience Assessment. IEEE Transactions on Engineering Management, 65(2). 2018. pp. 303-315.
 36. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: Наука. 2006. 410 с.
 37. Быков А.П., Пиганов М.Н. Прогнозирование показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств // Труды МАИ. 2021. №116. http://mai.ru/upload/iblock/bdd/Bykov_Piganov_rus_eng.pdf. DOI: 10.34759/trd-2021-116-05.
 38. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В. Опытнотехнологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» // Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.
 39. Шипов М.Г. Гашение угловых скоростей КА «Аист-2Д» с использованием системы сброса кинетического момента // Вестник самарского университета. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2019. Т. 18. №2. С. 121-127.

Павлов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского; ведущий научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)). Область научных интересов: системный анализ и принятие решений в условиях существенной неопределенности, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 300. pavlov62@list.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(911)259-7153.

Павлов Дмитрий Александрович — канд. техн. наук, преподаватель, кафедра технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в автоматизированных системах управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 70. dpavlov239@mail.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(963)348-2310.

Умаров Александр Бахтиёрович — адъюнкт, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 12. antropicier737@gmail.com; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(911)213-2123.

Гордеев Андрей Владимирович — адъюнкт, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 10. grd611@bk.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(999)002-2598.

Поддержка исследований. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№20-08-01046), в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

A. PAVLOV, D. PAVLOV, A. UMAROV, A. GORDEEV
**METHOD OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF
CONFIGURATION MULTI-MODE OBJECT**

Pavlov A., Pavlov D., Umarov A., Gordeev A. Method of Structural-Parametric Synthesis of Configuration Multi-Mode Object.

Abstract. The complexity of modern objects with a reconfigurable structure leads to the need to take into account various factors of their interaction with the environment and is associated with an increase in the number of their constituent elements and subsystems, as well as, accordingly, a rapid increase in the number of internal connections, and manifests itself in such aspects as structural complexity, complexity of functioning, complexity of choice of behavior, complexity of modeling and complexity of development. These systems operate in conditions of significant uncertainty associated with a change in the content of the goals and objectives facing the object, the impact of disturbing factors from the external environment and having a targeted and / or non-targeted character. These aspects of the complexity of the system are associated not only with the uncertain effects of the external environment, but also with many different modes (types) of functioning, corresponding to the multiplicity of tasks being solved and the multiplicity of indicators of the quality of their solution. As a rule, systems with a fixed structure, usually tuned to a steady (some given) mode, do not provide the best control quality in other modes. Therefore, the multi-mode and uncertainty of the operating conditions necessitate solving the problem of analysis and synthesis of the configuration and reconfiguration of the objects under consideration, based on intelligent approaches. At the same time, at the stages of creating and designing objects with a tunable structure, such interconnected sets of modes of operation and structures should be synthesized, and, possibly, such a level of redundancy should be introduced into these sets, taking into account space-time, technical and technological restrictions, under which at the stage of their application for the intended purpose, it would be possible to respond flexibly to all design and off-design contingencies that cause structural changes in the object. From a formal point of view, the solution to these problems is possible within the framework of such an important class of modern scientific and technical problems as the problems of multi-criteria structural-functional synthesis of configurations of multi-mode objects at various stages of their life cycle. This article presents a method for solving these problems, based on the concept of the parametric genome of complex multi-mode objects proposed by the authors. The application of this concept makes it possible to store in a concentrated form the explicit and implicit knowledge of experts about the interaction of elements and subsystems of an object when performing various combinations of the implementation of operating modes, as well as to quickly calculate optimistic and pessimistic estimates of indicators of structural and functional reliability of homogeneous / heterogeneous, monotonous / non-monotonic, equivalent / unequal multi-mode objects. With a multi-criteria choice of the required number of non-dominated variants of configurations of a multi-mode object, evenly distributed in the set of effective (Pareto) alternatives, a combination of the method of interval lexicographic ordering (successive concessions) and an operator decision rule was proposed. At the same time, in order to conduct a detailed analysis of the possibility of implementing an object of joint or separate activation of operating modes with an equivalent or unequal intensity of their use, a fuzzy-possibility representation of a generalized indicator of structural and functional reliability in the form of a trapezoidal number and determining its center of gravity was proposed. The results of applying the developed method of structural-parametric synthesis of configurations of a multi-mode object with a tunable structure are presented on the example of the motion control system of the small spacecraft "Aist-2D".

Keywords: configuration synthesis, multi-mode object, multi-criteria, set of non-dominated alternatives, parametric genome.

References

1. Baluhto A.N., Romanov A.A. [Artificial intelligence in space technology: state, development prospects]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*. [Rocket and space instrumentation and information systems]. 2019. vol. 6. no. 1. pp. 65–75. (In Russ.).
2. Mikaelyan L., Müller S., Gerndt A., Noll T. Synthesizing and Optimizing FDIR Recovery Strategies from Fault Trees. *Formal Techniques for Safety-Critical Systems. FTSCS 2018. Communications in Computer and Information Science*. Artho C., Ölveczky P. (eds). Springer, Cham. 2019. vol. 1008. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12988-0_3
3. Tipaldi M., Glielmo L. A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft. *IEEE Systems Journal*. 2018. vol. 12. Issue 4. pp. 3893–3905.
4. Lianxiang J., Peipei X., Xuyang F. Software Reconfiguration Technology for Serviceable Satellite OBDH System. *Proceedings of the Second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, Harbin. 2017. pp. 100–104.
5. Amigoni F., Ferrari Dacrema M., Donati A., Laroque C., Lavagna M., Riva A. Aggregating Models for Anomaly Detection in Space Systems: Results from the FCTMAS Study. *Intelligent Autonomous Systems 15. IAS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Strand. Dillmann R., Menegatti E., Ghidoni S. (eds). 2019. vol. 867. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01370-7_12.
6. Wang D.-Y., Tu Y.-Y., Liu C.-R., He Y.-Z., Li W.-B. Connotation and Research of Reconfigurability for Spacecraft Control Systems: A Review. *Acta Automatica Sinica*. 2017. vol. 43. no. 10. pp. 1687–1702.
7. Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S.Y. Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies. *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54. no. 23. pp. 6969–6983.
8. Theorin A. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 1297–1311.
9. Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production. *International Journal of Production Research*. 2017. vol. 55. no. 5. pp. 1368–1385.
10. Sevast'janov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravlenija nadezhnost'ju kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami jekspluatcii: uchebnoe posobie* [Fundamentals of reliability management of spacecraft with long service life: textbook]. Izd. dom Tomskogo gos. un-ta. [Publishing house of the Tomsk state. university]. 2015. 265 p. (In Russ.).
11. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O., Vinogradov V.V. [Analysis of functional survivability of structurally complex technical systems]. *Nadezhnost' – 2018. [Reliability-2018]*. vol. 18. no. 2. 2018. pp. 17 – 24. (In Russ.).
12. Mehdi Jafari. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system. *Aerospace Science and Technology*. vol. 47. 2015. pp. 467-472.
13. Rajkunova G.G. *Ionizirujushhie izluchenija kosmicheskogo prostranstva i ih vozdejstvie na bortovuju apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Ionizing radiation of outer space and their impact on the onboard equipment of space vehicles]. M.: Fizmatlit. 2013. 256 p. (In Russ.).

14. Bukatova I.L. Jevoljucionnoe modelirovanie i ego prilozhenija [Evolutionary modeling and its applications]. M.: Nauka. 1979. 232 p. (In Russ.).
15. Kurenkov V.I., Kapitonov V.A. Metody raschjota i obespechenija nadjozhnosti raketno-kosmicheskikh kompleksov: uchebnoe posobie [Methods for calculating and ensuring the reliability of rocket and space systems: a tutorial]. Samara: izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta [Samara: publishing house of the Samara State Aerospace University.]. 2007. 320 p. (In Russ.).
16. Polenin V. I., Rjabinin I. A., Svirin S. K., Gladkova I. A. Primenenie obshhego logiko–verojatnostnogo metoda dlja analiza tehniceskikh, voennyh organizacionno–funkcional'nyh sistem i voozrzhennogo protivoborstva: monografija, nauchnoe izdanie [Application of the general logical-probabilistic method for the analysis of technical, military organizational and functional systems and armed confrontation: monograph, scientific edition]. SPb.: SPb–regional'noe otdelenie RAEN [SPb: St. Petersburg Regional Branch of the Russian Academy of Natural Sciences]. 2011. 416 p. (In Russ.).
17. Pavlov A. N., Vorotjagin V. N., Kulakov A. Ju., Umarov A. B. [Study of the structural and functional reliability of small space vehicles in solving problems of orientation]. M.:Avtonomnaja nekommercheskaja organizacija "Redakcija zhurnala "Informatizacija i svjaz" [M.:Autonomous non-profit organization "Editorial office of the journal "Informatization and Communication"]. 2020. no. 4. pp. 156–164. (In Russ.).
18. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. [Method for estimating the survivability indicators of onboard systems of small spacecraft under conditions of changing modes of operation and destructive impacts]. Trudy MAI [Proceedings of the MAI]. 2021. no. 120. pp. 1–29. (In Russ.).
19. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations. Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020). St. Petersburg, Russian Federation, Dec. 11-12, 2020. CEUR-WS 2021. 2021. vol. 2803. pp. 61-66.
20. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Aleshin E.N., Vorotjagin V.N., Umarov A.B. [Modeling and analysis of structural and functional reliability of complex multi-mode objects]. Trudy VKA imeni A.F. Mozhajskogo [Proceedings of the VKA named after A.F. Mozhaisky.] 2021. №677. pp. 186-194. (In Russ.).
21. Pavlov A.N., Umarov A.B., Aleshin Ye.N. Study of the structural significance of supply chain elements with variable order rate // Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021. CEUR-WS 2021. 2021. vol-2924. pp. 1-8.
22. Filatov A.V., Tkachenko I.S., Tjugashev E.V., Sopchenko E.V. [Mathematical support of the small spacecraft motion control system]. Informacionnye tehnologii i nanotehnologii. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly. Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Samarskij gosudarstvennyj ajerokosmicheskij universitet imeni akademika S.P. Koroleva (Nacional'nyj issledovatel'skij universitet)» [Information technologies and nanotechnologies. Materials of the International Conference and Youth School. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Queen (National Research University)"]. Samara. 2015. pp. 290-294. (In Russ.).
23. Vasil'kov Ju.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. [Methodology for assessing the functional characteristics of radio monitoring systems with limited data on reliability parameters]. Trudy MAI [Proceedings of the MAI]. 2019. №108. DOI: 10.34759/trd-2019-108-16. (In Russ.).

24. Manuilov Yu.S., Pavlov D.A., Pavlov A.N., Slin'ko A.A. The Technique of Informational Interaction Structural-parametric Optimization of a Earth's Remote sensing Small Spacecraft Cluster // Springer International Publishing, Switzerland. 2018. vol. 3: Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems. pp. 155-166.
25. Larichev O.I. Verbal'nyj analiz reshenij [Verbal decision analysis]. M.: Nauka. 2006. 181 p. (In Russ.).
26. Borodin V.V. [Evaluation of the reliability of serviceable devices of the orbital space station]. Trudy MAI [Proceedings of the MAI]. 2012. №58. 12 p. (In Russ.).
27. GOST 27.003-90. [Reliability in technology. Composition and general rules for setting reliability requirements]. 1990. (In Russ.).
28. Kolodezhnyj L.P., Chernodarov A.V. Nadezhnost' i tehničeskaja diagnostika [Reliability and technical diagnostics]. M.: Izd. VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Ju.A. Gagarina. 2010. 452 p. (In Russ.).
29. Podinovskij V. V., Nogin V. D. [Pareto-optimal solutions to multiobjective problems]. M.: Nauka. 1982. 254 p. (In Russ.).
30. Kalinov M.I., Rodionov V.A. [Justification of the choice of a rational option for the use of small spacecraft in case of failures of individual elements of their onboard systems]. IX vserossijskaja nauchno-praktičeskaja konferencija po imitacionnomu modelirovaniju i ego primeneniju v nauke i promyšlennosti (IMMOD-2019) [IX All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry (IMMOD-2019)]. 2019. pp. 434-438. (In Russ.).
31. Kini R.L., Rajfa H. [Decision Making Under Multiple Criteria: Preferences and Substitutions]. M.: Radio i svjaz' [M.: Radio and communication.]. 1981. 560 p. (In Russ.).
32. Nogin V.D. [Decision Making in a Multicriteria Environment: A Quantitative Approach]. M.: Fizmatlit. 2005. 176 p. (In Russ.).
33. Nogin V.D. [Problems of narrowing the Pareto set: approaches to the solution]. Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij [Artificial intelligence and decision making]. 2008. № 1. pp. 98-112. (In Russ.).
34. Moskvina B.V. Teorija prinjatija reshenij: učebnik [Decision Theory: Textbook]. Spb.: VKA im. A.F.Mozhajsckogo. 2014. 383 p. (In Russ.).
35. Pavlov A., Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach to Supply Chain Resilience Assessment. IEEE Transactions on Engineering Management, 65(2). 2018. pp. 303-315. (In Russ.).
36. Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects]. M.: Nauka. 2006. 410 p. (In Russ.).
37. Bykov A.P., Piganov M.N. [Forecasting quality indicators of on-board radio electronic devices]. Trudy MAI [Proceedings of the MAI]. 2021. №116. http://mai.ru/upload/iblock/bdd/Bykov_Piganov_rus_eng.pdf. DOI: 10.34759/trd-2021-116-05. (In Russ.).
38. Kirilin A.N., Ahmetov R.N., Shahmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Gorjachkin O.V. [Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D"]. Samara: Izd-vo SamNC RAN [Samara: Publishing House of SamNTs RAS]. 2017. 324 p. (In Russ.).
39. Shipov M.G. [Angular velocity suppression of the Aist-2D spacecraft using the angular momentum release system]. Vestnik samarskogo universiteta. Aviacionnaja i raketno-kosmicheskaja tehnika [Bulletin of the Samara University. Aviation and rocket and space technology]. 2019. vol. 18. no. 2. pp. 121-127. (In Russ.).

Pavlov Alexander — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor of the department, Department automated control systems space complexes, Mozhaisky Military Space Academy; Senior researcher, Laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: systems analysis and operations research by conditions of substantial uncertainty, the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 300. pavlov62@list.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(911)259-7153.

Pavlov Dmitry — Ph.D., Teacher, Department of technologies and tools for complex processing and transmission of information in an automated control system, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of scientific bases of control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 70. dpavlov239@mail.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(963)348-2310.

Umarov Alexander — Post-graduate student, Department automated control systems space complexes, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of scientific bases of control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 12. antropicier737@gmail.com; 13, Zhdanovskaya St., 197198, , Russia; office phone: +7(911)213-2123.

Gordeev Andrey — Post-graduate student, Department automated control systems space complexes, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of scientific bases of control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 10. grd611@bk.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(999)002-2598.

Acknowledgements. Research carried out on this topic was carried out with partial financial support from RFBR grants (No. 20-08-01046), under the budget theme FFZF-2022-0004.