

УДК 681.550.43.19

**АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ  
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ  
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**С. В. Васильев, В. А. Демчук, А. В. Лущик**

*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)*

**Поступила в редакцию 22.09.2017 г.**

**Аннотация.** В статье рассмотрен алгоритм оптимального (рационального) распределения ресурсов интегрированной вычислительной системы летательного аппарата на этапе проектирования. Предложенный подход подразумевает определение оптимальной структуры системы в виде матрицы состояния и соответствующего ей ориентированного мультиграфа в условиях деградации системы. Определены возможные стратегии распределения ресурсов. Приведены результаты численного моделирования для произвольной системы.

**Ключевые слова:** функциональная устойчивость, отказ, деградация, мультиграф, интегрированная вычислительная система.

**Annotation.** In the article the algorithm of optimum (rational) distribution of resources of the integrated computing system of a flight vehicle at a design stage is considered. The offered approach means definition of an optimum structure of a system in the form of a matrix of a condition and the orientated multigraph corresponding to it in the conditions of system degradation. Possible strategy of distribution of resources are determined. Results of numerical modeling for any system are resulted.

**Keywords:** functional stability, failure, degradation, a multigraph, the integrated computing system.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Достижения последних лет, связанных с развитием микроэлектроники и элементной базы в частности, определили направление развития в отрасли самолето- и вертолетостроение [1, 2, 3, 4]. Возможности современных цифровых вычислителей, измерителей, индикаторов, а также высокоскоростных каналов передачи данных позволяют формировать архитектуру бортового радиоэлектронного оборудования летательного аппарата (ЛА) по принципу интегрированной вычислительной системы (ИВС) [5, 6]. При этом ИВС представляет собой некоторое масшта-

бируемое множество распределенных аппаратно-программных средств (АПС), образующее единую вычислительную платформу для выполнения определенного набора задач. Под набором задач здесь понимается некоторый набор функций, реализуемых системой в целях решения возлагаемых на нее задач.

Функционирование подсистем ИВС в реальных условиях сопряжено с возникновением отказов тех или иных модулей. При этом отказ отдельного модуля ИВС может привести как к полному отказу системы, так и функционированию в режиме частичной работоспособности, возможном за счет перераспределения функций отказавшего модуля между исправными модулями системы [7, 8, 9]. Одной из возможных реакций системы

на отказ является функциональная реконфигурация [10], а свойство системы сохранять способность выполнения возложенных на нее функций с требуемым качеством в условиях функциональных отказов трактуется как функциональная устойчивость. Задача реконфигурации ИВС в полете требует непрерывного мониторинга состояния системы и принятия решения о выборе оптимальной структуры ИВС по известному правилу. Возможности системы на реконфигурацию напрямую определяют безопасность функционирования [11] системы и качество выполнения задач в целом. В свою очередь, схемотехнические решения, принятые на этапе проектирования ИВС, а также ресурс, имеющийся в распоряжении системы на момент возникновения необходимости реконфигурации, полностью определяют эти возможности. Таким образом, задача оптимального (рационального) структурного синтеза ИВС на стадии проектирования при наличии ограничений на используемые ресурсы является в полной мере актуальной. В статье рассматривается алгоритм оптимального распределения ресурсов в ИВС ЛА на стадии проектирования, обеспечивающий максимальный уровень функциональной устойчивости системы при отказах в условиях эксплуатации.

## БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ

Приведем важные для дальнейшего понимания понятия и определения функциональной устойчивости сложных информационно-управляющих систем.

Наличие в ИВС многофункциональных или универсальных модулей, способных к взаимозаменяемости, определяет функциональную избыточность. В этом случае при возникновении отказов модулей ИВС можно говорить о переходе системы в новое состояние (работоспособное или неработоспособное). Работоспособное состояние системы определяется следующим образом.

Пусть произвольное состояние системы  $s_v$  характеризуется некоторой бинарной матрицей  $B(s_v) = [b_{ij}^{(v)}]$  размерности  $n \times m$ , где  $b_{ij}^{(v)} \in \{0, 1\}$ , причем

$$b_{ij}^{(v)} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й модуль способен} \\ & \text{выполнить } j\text{-ю функцию,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – количество модулей в системе,  $m$  – количество функций, возложенных на систему,  $m = n$ .

Распределение функций, выполняемых модулями системы, будем задавать матрицей распределения  $R_k^{(v)}$ , представляющей собой матрицу подстановки, в которой

$$r_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_k^i = j, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $\sigma_k^i$  –  $i$ -й элемент  $k$ -й подстановки на множестве  $\{1, 2, \dots, n\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, n!\}$ .

Под *работоспособным* состоянием будем понимать такое состояние, при котором существует хотя бы один вариант распределения функций между модулями, определяемый матрицей  $R_k^{(v)}$ , позволяющий выполнять эти функции одновременно, т. е.

$$b_{i, \sigma_k^i}^{(v)} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (2)$$

В таком случае, состояние  $s_v$  можно считать работоспособным, если существует такая подстановка  $\sigma_k$ , при которой диагональное произведение элементов матрицы состояния  $B(s_v)$  окажется ненулевым, т. е.

$$\exists \sigma_k : \prod_{i=1}^n b_{i, \sigma_k^i}^{(v)} \neq 0, \quad (3)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n\}, k \in \{1, 2, \dots, n!\}.$$

Перманент матрицы состояния  $B(s_v)$  порядка  $n$  определяется следующим образом [12]:

$$\text{per } B = \sum_{\sigma} b_{1, \sigma_1}^{(v)} \cdot b_{2, \sigma_2}^{(v)} \cdot \dots \cdot b_{n, \sigma_n}^{(v)}, \quad (4)$$

т. е. перманент есть сумма диагональных произведений, задаваемых множеством подстановок  $\sigma_k$ . Таким образом, положительное значение перманента матрицы состояния  $B(s_v)$  подразумевает наличие под знаком суммы хотя бы одного ненулевого диагонального произведения, что, в свою очередь позволяет на основании (2) утверждать о работоспособности системы в состоянии  $s_v$ .

На основе (2) и (3) можно определить понятия различных видов устойчивости системы к отказу.

Состояние  $s_v$  называется абсолютно устойчивым, если в результате возникновения отказа система переходит в состояние  $s_{v+1} \in S_r$ . Множество  $S_r$  состоит из элементов, удовлетворяющих условию

$$S_r = \{s_m \mid \exists \sigma_k : b_{i,\sigma_k}^{(m)} = 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}, k \in \{1, \dots, n!\}\}. \quad (5)$$

Состояние  $s_v$  называется условно устойчивым, если в результате возникновения отказа система переходит в состояние  $s_{v+1} \in S_r \cup S_f$ . Множество  $S_f$  состоит из элементов, удовлетворяющих условию

$$S_f = \{s_l \mid \exists i \in \{1, \dots, n\} : b_{i,\sigma_k}^{(l)} = 0, \forall k \in \{1, \dots, n!\}\}. \quad (6)$$

Состояние  $s_v$  называется неустойчивым, если в результате возникновения отказа система переходит в состояние  $s_{v+1} \in S_f$ .

В [10] показано, что произвольное состояние  $s_v$  является условно устойчивым, если перманент матрицы состояния больше либо равен двум, т. е.

$$per(B(S_v)) = \sum_{k=1}^{n!} \prod_{i=1}^n b_{i,\sigma_k(i)}^{(v)} \geq 2. \quad (7)$$

В дальнейшем в статье под множеством устойчивых состояний  $S_{уст}$  будем понимать объединение множеств абсолютно и условно устойчивых состояний.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ИВС

Рассмотрим систему, состоящую из  $n$  модулей, способных выполнить  $n$  функций  $f_i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Определим эти функции как *внутренние*. Матрица состояния  $B(S_v)$  формируется по правилу (1). Способность  $i$ -го модуля выполнить  $j$ -ю функцию,  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ , ( $b_{ij} = 1$  в матрице  $B(S_v)$ ) предполагает наличие некоторого множества аппаратно-программных средств (АПС), обеспечивающих выполнение данной функции. Такое множество будем называть ресурсом  $c_{ij}$ , а сумму всех  $c_{ij}$  – суммарным ресурсом, или возможностью системы на реконфигурацию

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}, \quad 0 \leq C \leq n^2, \quad c_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (8)$$

Реализация  $j$ -й внутренней функции  $f_{ij}$ , выполняемой  $i$ -м модулем, требует выделения ресурса  $c_{ij}$ . Множеству всех таких АПС  $c_{ij}$  поставим в соответствие множество уровней качества  $q_{ij} \in Q_i$ , где  $Q_i$  – вектор качества  $i$ -го модуля системы. Тогда  $Q_i \in Q$ , где  $Q$  – матрица, характеризующая качество системы в целом,  $Q = \|q_{ij}\|$ .

Предположим, что целью функционирования системы является выполнение некоторого набора функций  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_M\}$ . Функции  $F$  являются результатом выполнения набора  $f$  на более низком. Функции  $F$  будем называть *внешними*, а их формальное описание представим в виде элементарных конъюнкций

$$F_j = \bigcap_K f_i, \quad f_i \in K, \quad k \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (9)$$

где  $K$  – множество всех внутренних функций.

Очевидно, что в результате возникновения функциональных отказов, приводящих к деградации системы, качество выполнения внешних функций  $F_j$  будет снижаться  $Q_{F_j} \rightarrow 0$  [13]. Под деградацией понимается изменение структурно-функционального состава системы, вызванное отказами. При этом имеющиеся механизмы реконфигурации должны обеспечить такое перераспределение внутренних функций, чтобы осуществить выполнение внешних функций  $F$  с требуемым или минимальным уровнем качества за счет оставшихся в системе ресурсов. То есть

$$\begin{cases} Q_{F_j} \geq Q_{F_j\_мреб}, & \text{при } C_i \geq C_{\min} \\ Q_{F_j} \geq Q_{F_j\_мин}, & \text{при } C_{крит} \leq C_i \leq C_{\min}. \end{cases} \quad (10)$$

При объеме оставшихся в системе ресурсов  $C_i < C_{крит}$  качество выполнения  $F_j$   $Q_{F_j} < Q_{F_{мин}}$ , принимается решение, что функция  $F_j$  системой не выполняется.

Объем ресурсов  $C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}$ , а также распределение АПС  $c_{ij}$  по модулям определяет структуру системы  $Str^i$  на всем множестве  $Str$ , то есть  $Str^i \in Str$ . Тогда задачу оптимизации структуры системы можно представить следующим образом.

*Постановка задачи:* необходимо найти такую структуру  $Str^i \in Str$ , определяемую ре-

сурсом  $C$ , для которой на всем множестве устойчивых состояний  $S_v \in S_{уст}$  будет выполняться условие максимума качества выполнения набора внешних функций  $F$  в условиях деградации системы. Другими словами, задача сводится к поиску матрицы  $B$ , для которой выполняется

$$\max(\sum_{L_i} Q_{\Sigma}^i(L_i)), \quad i \in (0, C), \quad (11)$$

$$B = \|b_{ij}\|, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} = C,$$

$$0 \leq C \leq C_{\max} \leq n^2,$$

где  $Q_{\Sigma}^i = k_1 Q_{F_1}^i + k_2 Q_{F_2}^i + \dots + k_M Q_{F_M}^i = \sum_{j=1}^M k_j Q_{F_j}^i$  – линейная взвешенная сумма, определяющая уровень качества выполнения внешних функций,  $M$  – количество внешних функций,  $\{k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_M\}$  – множество коэффициентов важности внешних функций,  $L_i$  – коэффициент деградации системы.

### АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ИВС

Одним из наиболее удобных инструментов для формального описания структуры системы является теория графов [14]. Представим проектируемую систему, состоящую из  $n$  модулей, в виде взвешенного ориентированного мультиграфа  $G(V, E, Q)$ , в котором  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множество вершин, поставленных в соответствие модулям системы,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_z\}$  – множество дуг, соответствующих внутренним функциям  $f_{ij}$  системы,  $Q = \|q_{ij}\|$  – матрица весов дуг, характеризующая качество выполнения  $j$ -й функции  $i$ -м модулем. Граф строится следующим образом:

1. В бинарной матрице состояния  $B(S_{v_0})$  случайным образом распределяются единичные элементы  $b_{ij} = 1$ , количество таких элементов определяется из условия

$$N_{b_{ij}=1} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} = C, \quad C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}. \quad (12)$$

2. Вершины графа нумеруются от 1 до  $n$ ,  $i$ -я вершина соответствует  $i$ -му модулю в системе. Таким образом, граф  $G$  является помеченным.

3. Множество дуг в графе равно

$$f_{ij} : E_i^j = \{e_{il}^j\}, \quad l \in (1, n), \quad l \neq i,$$

$$E^j = \{E_1^j, E_2^j, \dots, E_k^j\},$$

$$E = \{E^1, E^2, \dots, E^n\}.$$

где  $k = \sum_{i=1}^n b_{ij}$  – количество модулей, способных выполнить  $j$ -ю функцию.

Таким образом, выполнение  $i$ -м модулем  $j$ -й функции  $f_{ij}$  соответствует на графе наличию  $n-1$  дуг  $e_{il}^j$ , исходящих из  $i$ -й вершины и входящих во все остальные. Исходя из этого, граф  $G(V, E, Q)$  является полным. Общее количество дуг, исходящих из  $i$ -й вершины, определяется как

$$E_{уцх}^i = \sum_{j=1}^{P_i} \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^n e_{il}^j, \quad (13)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (14)$$

$P_i$  – количество функций, выполняемых  $i$ -м модулем.

4. Каждой дуге  $e_{il}^j$  назначается вес из матрицы  $Q = \|q_{ij}\|$ , причем

$$q(e_{il}^j) = \dots = q(e_{il}^j) = \dots = q(e_{im}^j) = q_{ij}, \quad l \neq i.$$

Матрица  $Q$  формируется экспертным методом. Значения элемента  $q_{ij}$  (веса) определяется, исходя из качества достижения (выполнения)  $i$ -м модулем  $j$ -й цели (функции), т. е.  $ij$ -АПС, относительно других АПС остальных модулей. Другими словами, выполняется условие нормировки по каждому столбцу матрицы  $Q$

$$Q_{\cdot j} = \sum_{i=1}^n q_{ij} = 1. \quad (15)$$

Определение на графе  $G(V, E, Q)$  возможности выполнения системой набора внешних функций  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_M\}$  сводится к нахождению всех возможных маршрутов для каждой  $F_j$ , а качества выполнения  $F_j$  – маршрутом с наибольшим весом  $Q_{F_j \max}$ . Количество возможных маршрутов определяется, с одной стороны, ресурсом  $C$ , а с другой, составом самих функций  $F_j$ . Чем больше таких маршрутов имеется на графе, тем большими возможностями на реконфигурацию обладает система, подвергающаяся деградации вследствие возникающих отказов. Нетрудно пока-

зять, что, в зависимости от варианта распределения ресурсов  $c_{ij}$  по модулям, будет изменяться конфигурация графа  $G$ . Это, в свою очередь, приводит к формированию нового множества маршрутов и соответствующих им весов.

Нахождение маршрута с наибольшим весом можно свести к задаче о наибольшем потоке, широко описанной в литературе, например, [15]. Алгоритм отыскания пути с  $Q_{F_j \max}$  в общем виде можно представить следующим образом:

1. Пусть задан набор внешних функций

$$F = \{F_1, F_2\},$$

$$F_1 = f_x \wedge f_y \wedge f_z,$$

$$F_2 = f_a \wedge f_b \wedge f_c.$$

2. Для графа  $G$  формируется матрица инцидентий  $A = \|a_{ij}\|_{n \times d}$ , где  $d = \sum_{i=1}^n P_i(n-1)$ .

3. Случайным образом выбираем  $i$ -ю вершину на графе  $G$ . По матрице  $A$  находим дуги, инцидентные  $i$ -й вершине, причем множество таких дуг будет принадлежать множеству  $E_i^x = \{e_{i1}^x, e_{i2}^x, \dots, e_{il}^x, \dots, e_{in}^x\}$ ,  $l \in (1, n)$ ,  $l \neq i$ . Искомые элементы будут иметь единицу на  $i$ -й строке матрицы  $A$ .

4. Из тех вершин, в которые можно попасть из  $i$ -й вершины, перебором определяются такие, которым инцидентны дуги из множества  $E_h^y = \{e_{h1}^y, e_{h2}^y, \dots, e_{hl}^y, \dots, e_{hn}^y\}$ ,  $l \in (1, n)$ ,  $l \neq h$ .

5. Аналогичным образом осуществляется поиск дуг из  $E_s^z = \{e_{s1}^z, e_{s2}^z, \dots, e_{sl}^z, \dots, e_{sn}^z\}$ ,  $l \in (1, n)$ ,  $l \neq s$  для функции  $f_z$ .

6. Все найденные маршруты вида  $ie_{ih}^x he_{hs}^y se_{sr}^z$  формируют перечень возможных сценариев выполнения  $F_1(f_x, f_y, f_z)$ .

7. Для каждого  $k$ -го маршрута вычисляется значение  $Q_{F_1k}$

$$Q_{F_1k} = q(e_{ii}^x) + q(e_{ik}^y) + q(e_{kr}^z),$$

$$Q_{F_1k} = q_{ix} + q_{ly} + q_{kz}. \quad (16)$$

8. Определяется  $Q_{F_1 \max} = \max Q_{F_1k}$ .

9. Для функции  $F_2$  выполняются шаги 1–8.

Определение оптимальной структуры, как было сказано ранее, сводится к поиску матрицы  $B(S_{v_0})$ , которой соответствует максимум

целевой функции (11). В рамках данного подхода можно использовать одну из следующих стратегий распределения ресурсов: стратегии полного функционала (СПФ) или стратегии критических функций (СКФ).

*Стратегия полного функционала* – распределение АПС, направленное на достижение максимума качества выполнения набора внешних функций при условии выполнения каждой в отдельности не ниже заданного уровня.

$$Q_{\Sigma} = k_1 Q_{F_1} + k_2 Q_{F_2} + \dots + k_M Q_{F_M},$$

$$Q_{\Sigma} = \sum_{j=1}^M k_j Q_{F_j}, \quad (17)$$

$$Q_{\Sigma}^{СПФ} = \max Q_{\Sigma}, \quad Q_{F_j} \geq Q_{F_j \min},$$

$$\forall j \in [1, M].$$

*Стратегия критических функций* – распределение АПС, направленное на достижение максимума качества выполнения набора критических внешних функций, при этом остальные допускается не выполнять.

$$Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma_1} + Q_{\Sigma_2}, \quad (18)$$

$$Q_{\Sigma_1} = \sum_{j=1}^u k_j Q_{F_j}, \quad Q_{\Sigma_2} = \sum_{j=u+1}^M k_j Q_{F_j},$$

$$Q_{\Sigma}^{СКФ} = \max Q_{\Sigma_1},$$

$$Q_{F_j} \geq Q_{F_j \min}, \quad \forall j \in [1, u],$$

$$Q_{F_j} \geq 0, \quad \forall j \in [u+1, M],$$

где  $\{F_j\}$ ,  $j \in [1, u]$  – множество критических функций.

Введенные определения СПФ и СКФ, а также соответствующие им целевые функции  $Q_{\Sigma}^{СПФ}$  и  $Q_{\Sigma}^{СКФ}$ , в первую очередь, раскрывают сущность принимаемых проектных решений с точки зрения деградации системы.

### АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ДЕГРАДАЦИИ

Для оценки эффективности работы системы в условиях деградации воспользуемся разработанной ранее графовой моделью структуры. Возникновение функционально отказа, то есть потеря  $i$ -м модулем способно-

сти выполнить  $j$ -ю функцию, соответствует удалению на графе  $G(V, E)$   $n-1$  дуг  $e_{il}^j$

$$E_i^j = \{e_{il}^j\} = \emptyset, l \in \{1, n\}, l \neq i.$$

При этом получается частичный граф  $G'(V, E'), G' \subset G$ . Появление последующих отказов приводит к образованию  $G''(V, E'') \rightarrow G'''(V, E''') \rightarrow \dots \rightarrow O_n$ , где  $O_n$  - пустой граф порядка  $n$ , в котором нет ни одной дуги, то есть  $E = \emptyset$ . Такое состояние соответствует полной деградации системы.

Определим коэффициент деградации  $L_i$  как

$$L_i = \frac{r_0 - r_i}{r_0}, \quad (19)$$

где  $r_0$  - количество дуг в графе до начала деградации системы;

$r_i$  - количество дуг в графе на  $i$ -м уровне деградации;

$$r = \frac{1}{2} [\rho(v_1) + \rho(v_2) + \dots + \rho(v_n)], \quad (20)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_n \in V, |V| = n,$$

$\rho(v_k)$  - локальная степень  $k$ -й вершины. Соответственно,

$$r_0 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \rho_0(v_k), r_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \rho_i(v_k), \quad (21)$$

Следовательно, каждому графу  $G^{\sim}(V, E^{\sim})$  соответствует коэффициент деградации  $L_{\sim}$

$$G \rightarrow L_0, G' \rightarrow L_1, G'' \rightarrow L_2,$$

$$G''' \rightarrow L_3, \dots, O_n \rightarrow L_C,$$

А также значение целевой функции  $Q_{\Sigma}$

$$G \rightarrow Q_{\Sigma}^0, G' \rightarrow Q_{\Sigma}^1, G'' \rightarrow Q_{\Sigma}^2,$$

$$G''' \rightarrow Q_{\Sigma}^3, \dots, O_n \rightarrow Q_{\Sigma}^C.$$

Если вероятность отказа всех АПС имеет равномерное распределение

$$p_{ij} = p, \forall i \in (1, n), \forall j \in (1, n),$$

то отказ, например, одного АПС порождает целое семейство (множество) графов  $G'_k$ , вероятность появления каждого из них равна  $p$

$$i = 1: G' = \{G'_1, G'_2, \dots, G'_C\}.$$

Другими словами, один отказ, но в разных модулях приводит к различным графам  $G'$  при одном и том же  $L_1$ . Поэтому, для каждого  $L_{\sim}$  (соответственно  $G^{\sim}$ ) целевая функция  $Q_{\Sigma}$  оценивается как математическое ожидание

$$\hat{Q}_{\Sigma}^{\sim} = \frac{\sum_{i=1}^l Q_{\Sigma}^{\sim(i)}}{t}. \quad (22)$$

Таким образом, траекторию системы в условиях деградации можно представить в виде упорядоченной тройки

$$T = \langle L^*, G^*, \hat{Q}_{\Sigma}^* \rangle, \quad (23)$$

$$L^* = \{L_0, L_1, L_2, \dots, L_C\},$$

$$G^* = \{G, G', G'', \dots, O_n\},$$

$$\hat{Q}_{\Sigma}^* = \{\hat{Q}_{\Sigma}^0, \hat{Q}_{\Sigma}^1, \hat{Q}_{\Sigma}^2, \dots, \hat{Q}_{\Sigma}^C\}.$$

Множество всех траекторий  $T_i$ , соответствующих множеству структур  $Str^i \in Str$ , отобразим на плоскости в виде зависимости  $\hat{Q}_{\Sigma}^*$  от  $L^*$  (рис. 1). Размещение множества траекторий на декартовой плоскости укладывается в окрашенную область.

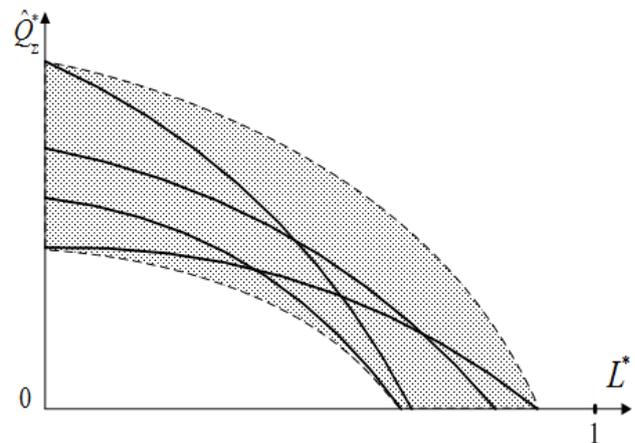


Рис. 1. Траектории структур  $Str^i$  при деградации системы

Определение оптимальной структуры сводится к анализу полученных зависимостей и определению степени их соответствия выбранному критерию.

### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ИВС

На рис. 2 изображены кривые, определяемые траекториями  $T_1$  и  $T_2$  для структур  $Str^1$  и  $Str^2$  соответственно.

Допустим, что

$$\sum_{L^1} \hat{Q}_{\Sigma}^i(L_i) \approx \sum_{L^2} \hat{Q}_{\Sigma}^j(L_j), \quad (24)$$

$$i \in L^1, j \in L^2,$$

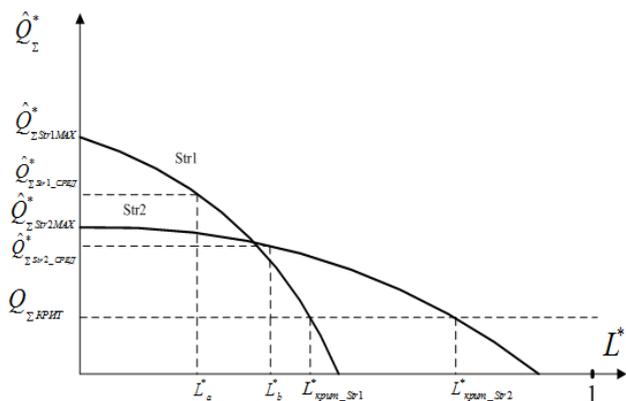


Рис. 2. Выбор критерия оптимальности

$$L^1 \in (0, L(\hat{Q}_{\Sigma Str1}^* = 0)),$$

$$L^2 \in (0, L(\hat{Q}_{\Sigma Str2}^* = 0)),$$

При этом фигуры, ограниченные осями и кривыми имеют различное основание по  $L^*$ . Необходимо определить оптимальную структуру из  $\{Str^1, Str^2\}$ .

Введем параметр  $Q_{\Sigma KPИT}$  – минимальное значение целевой функции, или качества выполнения набора внешних функций  $F$ , при котором система еще работоспособна (условно работоспособна). Пересечения на плоскости кривых  $T_1$  и  $T_2$  с  $Q_{\Sigma KPИT}$  (рис. 2) определяют критические значения коэффициентов деградации  $L_{KPИT\_Str1}$  и  $L_{KPИT\_Str2}$  соответственно.

С введением  $Q_{\Sigma KPИT}$  имеет смысл рассматривать поведение кривых, а именно  $\hat{Q}_{\Sigma}^*$ , выше  $Q_{\Sigma KPИT}$ . При

$$\sum_{L^1} \hat{Q}_{\Sigma Str1}^i(L_i) \approx \sum_{L^2} \hat{Q}_{\Sigma Str2}^j(L_j),$$

$$i \in L^1, j \in L^2, \quad (25)$$

$$L^1 \in (0, L_{KPИT\_Str1}^*),$$

$$L^2 \in (0, L_{KPИT\_Str2}^*),$$

целесообразно рассматривать два критерия оптимальности.

*Критерий оптимальности 1* (в смысле живучести). Физический смысл данного критерия заключается в получении алгоритма выбора такой структуры  $Str^i$ , которая обеспечивала бы выполнения целей функционирования при максимально большем количестве отказов. Такой подход применим к системам, критических с точки зрения безопасности. Следовательно,

$$L_{KPИT\_Str1}^* > L_{KPИT\_Str2}^* \Rightarrow opt Str = Str^2.$$

*Критерий оптимальности 2* (в смысле качества). Применение данного критерия уместно для систем, критичных к качеству выполняемых задач. Например, пилотажные (навигационные) измерители в случае значительного превышения точностных характеристик экипажем ЛА попросту использоваться не будут, хотя информация, пусть и с грубыми ошибками, они предоставляют.

Если на этапе проектирования задаваться критерием 2, то поиск структур сводится к следующему. Выполняется анализ структур, описанный в разделах 3–5. При сравнении структур, для которых выполняется условие (25), дальнейший анализ осуществляется графическим способом (рис. 2): для кривых 1 и 2 (две произвольно выбранных траектории) находят средние значения  $\hat{Q}_{\Sigma\_CPEД}^*$ . Для этого определяют  $L_a^*$  и  $L_b^*$  как середины отрезков  $[0, L_{KPИT\_Str\_i}^*]$ . Из этих точек по нормали к оси абсцисс проводят линии до пересечения с соответствующими кривыми. Из полученных точек пересечения опускают нормали на ось ординат и получают  $\hat{Q}_{\Sigma Str1\_CPEД}^*$  и  $\hat{Q}_{\Sigma Str2\_CPEД}^*$ . Тогда имеем

$$\hat{Q}_{\Sigma Str2\_CPEД}^* > \hat{Q}_{\Sigma Str1\_CPEД}^* \Rightarrow opt Str = Str^1.$$

Критерий выбирается, исходя из особенностей системы и специфики решаемых ею задач.

### ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ИВС

Рассмотренный выше алгоритм решает задачу комбинаторного класса. Входным параметром в работе алгоритма является множество всех возможных структур  $Str$ . В силу большой размерности области поиска метод прямого перебора возможен, но практически не применяется. Так, для системы, состоящей всего из 5 модулей, распределение ресурса  $C = 10$  дает число возможных структур, равное количеству сочетаний из 25 по 10, то есть  $|Str| \approx 3,3 \cdot 10^6$ .

Исходные данные для моделирования

Параметр		Эксперимент		
		№ 1	№ 2	№ 3
Размерность системы $n$		5	5	5
Объем ресурсов $C$		6	12	20
Количество выборок		20000	20000	20000
Стратегия РР		СПФ	СПФ	СПФ
Коэфф. важности функций $k_j$	$k_1$	0,4	0,4	0,4
	$k_2$	0,3	0,3	0,3
	$k_3$	0,3	0,3	0,3
Минимальное качество $Q_{ff}$	$Q_{f1min}$	0,1	0,1	0,1
	$Q_{f2min}$	0,1	0,1	0,1
	$Q_{f3min}$	0,1	0,1	0,1
Порог ЦФ $Q_{крит}$		0,2	0,2	0,2

Разработанный алгоритм был реализован в программном продукте, написанном в среде MatLab. Моделирование осуществлялось при следующих исходных данных (табл. 1).

Предполагалось, что система выполняет три внешних функции

$$F_1 = f_1 \wedge f_2 \wedge f_5,$$

$$F_2 = f_3 \wedge f_4 \wedge f_5,$$

$$F_3 = f_1 \wedge f_2 \wedge f_3.$$

Результаты численного моделирования для исходных данных №№1, 2 и 3 представлены на рис. 3, 4 и 5 соответственно.

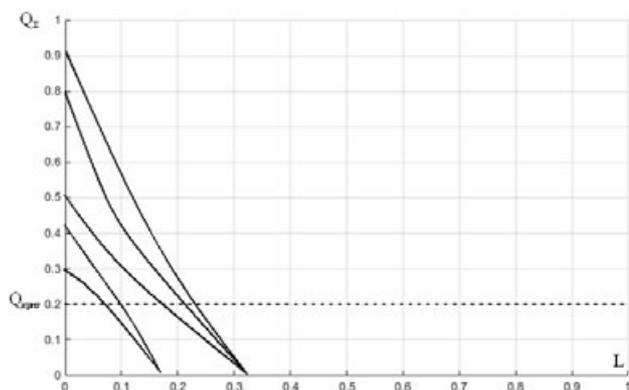


Рис. 3. Результаты моделирования при исходных данных № 1

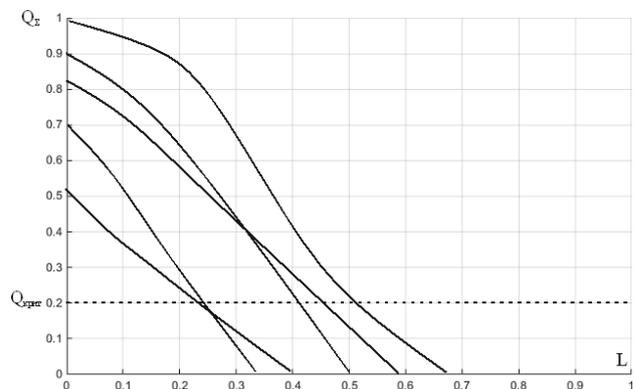


Рис. 4. Результаты моделирования при исходных данных № 2

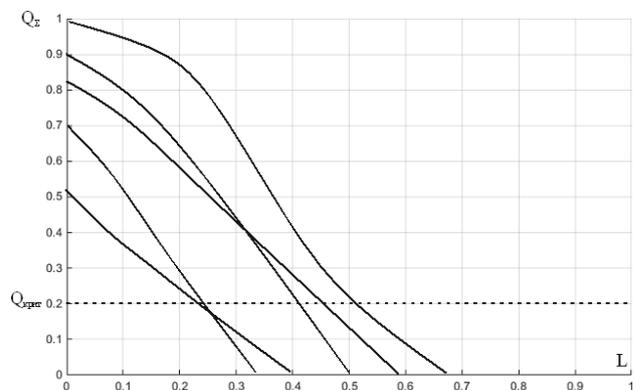


Рис. 5. Результаты моделирования при исходных данных № 3

Результатом моделирования для всех вариантов исходных данных стало нахождение оптимальной структуры  $Str^i$ , то есть матрицы  $B$ . Найденные матрицы  $B_{opt\_эксн1}$ ,  $B_{opt\_эксн2}$ ,  $B_{opt\_эксн3}$  имеют следующие значения

$$B_{opt\_эксн1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{opt\_эксн2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_{opt\_эксн3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты численных исследований алгоритма указывают на возможность нахождения такой структуры ИВС, определяемой выделенным составом программно-аппаратных средств, для которой будет выполняться условие максимума качества выполнения набора внешних функций. Особенностью предлагаемого алгоритма является наличие процедуры определения целевой функции в условиях деградации системы. Итоговое принятие решения осуществляется по выбранному критерию, позволяющему проектировать систему с учетом специфических особенностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. European Commission, «European Aeronautics: A Vision for 2020», January 2001.
2. ACARE, «Strategic Research Agenda», October 2002.
3. European Commission, «FlightPath 2050. Europe's Vision for Aviation», 2011.
4. ACARE, «Strategic Research and Innovation Agenda», September 2012.
5. Чуюнов Г. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И. Перспективные направления бортового обслуживания на базе интегрированной модуль-

ной авионики // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. – № 12 (40). – С. 55–62.

6. Аршакян А. А., Макарецкий Е. А., Шишков А. А. Модульное построение цифровой информационно-управляющей системы самолетов нового поколения // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – №6-2. – С. 161–169.

7. Семагин А. А., Чуркин Г. М. Выбор многофункциональных элементов структуры системы управления // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 3(51). – С. 95–98.

8. Бородакий Ю. В., Тарасов А. А. О функциональной устойчивости информационно-вычислительных систем // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2006. – № 7. – С. 79–93.

9. Лебедев Г. Н., Синевич Г. М., Михайлин Д. А. Разработка алгоритмического обеспечения для решения задачи резервирования источников информации на борту // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 2. – С. 11–15.

10. Тарасов А. А. Функциональная реконфигурация отказоустойчивых систем: монография / А. А. Тарасов. – М. : Логос, 2012. – 152 с.

11. Похил В. С. Методы оценивания и обеспечения функциональной безопасности бортовых информационно-управляющих систем летательных аппаратов / В. С. Похил, А. В. Харыбин // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2010. – Вип. 7 (48). – С. 278–282.

12. Минк Х. Перманенты: пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 216 с.

13. Азарнова Т. В., Леонтьев А. Н. Имитационная модель исследования динамики изменения интегральной оценки качества функционирования организационной системы // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 3. – С. 131–136.

14. Берж К. Теория графов и ее применение. – М. : Иностранная литература, 1962. – 319 с.

15. Оре О. Графы и их применение. – М. : Мир, 1965. – 174 с.

**Васильев Станислав Валерьевич** – адъюнкт ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». E-mail: stanislav-vas1986@mail.ru

**Демчук Валерий Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, начальник факультета авиационного оборудования ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». E-mail: vad\_912@mail.ru

**Лущик Александр Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». E-mail: lushchik-family@mail.ru

**Vasilyev Stanislav V.** – post-graduate student Air Force Education and Research Center «The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy». E-mail: stanislav-vas1986@mail.ru

**Demchuk Valeriy A.** – Candidate of Science (Technical), assistant professor, chief of faculty of aviation equipment Air Force Education and Research Center «The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy». E-mail: vad\_912@mail.ru

**Lushchik Alexander V.** – Candidate of Science (Technical), assistant professor, head of department Air Force Education and Research Center «The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy». E-mail: lushchik-family@mail.ru