

В.М. Воробьев, Н.П. Джиджора,  
А.М. Рутов, Ю.В. Доброгорская, М.В. Воробьева

## СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВИОНИКИ

*В предложенной математической модели процесса функционирования эргатического комплекса «экипаж – воздушное судно – среда» представлена совокупность системных требований к качеству, ресурсам и динамике процессов. Введены ограничения в виде ресурсов: технических и методических, по набору функционалов, операторов структур алгоритмов, по условиям функционирования комплекса и его логики работы, условиям согласованности структур алгоритмов и логики задач. Сформулировано условие системной оптимизации к целевым показателям и свойствам создаваемой интегрированной автоматизированной системы управления (ИАСУ). Сформировано «дерево» критериев системной эффективности функционирования логико-динамического комплекса. Модель распространяется на широкий спектр структур авионики.*

Основу процессов реализации принципов программированной эксплуатации составляют методы системного проектирования на основе моделирования и системной оптимизации, а также организационно-методические и теоретические базисы создания, производства и эксплуатации систем и комплексов авиационного оборудования (АО) и авионики.

В целевом аспекте программирование жизненного цикла (ЖЦ) – это процесс оптимального управления и планирования разработкой и функционированием поколений систем на основе системных критериев эффективности процессов, включающий в себя этапы формирования:

- системных критериев эффективности для ЖЦ;
- оптимального распределения ресурсов на ЖЦ;
- программированной эксплуатации комплекса «экипаж – ВС – среда».

Системный подход обеспечивает интеграцию усилий на ЖЦ по единой целевой программе по критерию максимальной эффективности конечных целей. Оценим методические и научные подходы формирования системных требований и сформулируем проблему системной оптимизации как аспекта управления.

Заданы варианты: структуры схем задач на этапах ЖЦ; варианты структур схем алгоритмов решения задач оценки технического состояния комплекса и его соотнесенности к особым случаям полета; ресурсы на реализацию по этапам ЖЦ и их временные характеристики. Формирование системных требований в проблеме системной оптимизации можно представить в виде, когда заданы конструктивные характеристики следующей логической последовательности:

<Уровни целей> → <Уровни задач> → <Уровни методов> → <Уровни алгоритмов> → <Процессы, методики>.

На основании работ [1] – [4] сформированы системные требования к качеству, ресурсам, динамике процессов.

Требования к качеству результирующих процессов функционирования комплекса  $Z/W_{\beta}$

$$Z = J_{\beta}(Z/W_{\beta}) \leq Z^*,$$

где  $Z, Z_c^*$  – качество функционирования комплекса соответственно текущее и нормативное;  $J_\beta$  – семейство функционалов качества процессов  $(J_{s\beta})_{s \in S}$ ;  $e^*$  – совокупность свойств и характеристик комплекса.

## 2. Требования к ресурсам

$$C = \sum_{\alpha \in E^{(A)}} T_{\alpha\beta} \leq C e^*,$$

где  $T_{\alpha\beta}$  – обобщенная трудоемкость выполнения операции для структуры  $\beta \in B$ ,  $C e^*$  – нормативный ресурс для достижения цели  $e^*$ .

## 3. Требования к динамике процессов проектирования (времени)

$$t = L_\beta \frac{T_{\alpha\beta}}{h_{\alpha\beta} \left( \sum_{p \in E^{(P)}} \zeta_p(a) \right)} \leq t e^*,$$

где  $L_\beta$  – функция производительности во времени  $t_{\alpha\beta}$  алгоритма  $\sum^{(A)}$  на стадиях и этапах ЖЦ и при варианте структуры  $\beta \in B$ ;

$$t_{\alpha\beta} = \frac{T_{\alpha\beta}}{h_{\alpha\beta} \left( \sum_{p \in E^{(P)}} \zeta_p(a) \right)} - \text{время выполнения операции } \alpha \text{ и при варианте структуры } \beta \in B;$$

$h_{\alpha\beta} \left( \sum_{p \in E^{(P)}} \zeta_p(a) \right)$  – трудоемкость на выполнение операции  $\alpha$  и варианте структуры алгоритма  $\beta$ ;

$$\sum_{p \in E^{(P)}} \zeta_p(a) - \text{ресурс на выполнение операции } \alpha.$$

Ограничениями при системной оптимизации выступают ресурсы: технические и методические; по операциям; по набору функционалов, операторов и структур алгоритмов; условиям функционирования; логики работы комплекса и условий согласованности структур алгоритмов и логики задач. Соответственно:

1.  $\sum_{p \in E^{(P)}} \zeta_p \leq \zeta$  – ограничения ресурсов авиапредприятий, в том числе технические, программно-методические, технические средства обучения персонала.

2.  $\zeta_p(\alpha) = 0$ , если  $\phi_\beta^{(A)} \cup \psi_\beta^{(A)}$ ,  $\alpha = \emptyset$ ,  $\alpha = E^{(P)}$  – ограничения на ресурсы по операциям при варианте структуры  $\beta$ .

3.  $j_{s\beta} \in J_{s\beta}$ ,  $s \in S$ ,  $\beta \in B$  – набор оперируемых функционалов.

4.  $f_{\alpha\beta} \in F_{\alpha\beta}$ ,  $\alpha \in E^{(A)}$ ,  $\beta \in B$ , где  $F_{\alpha\beta}$  – набор операторов для задачи.

5.  $\beta \in B$ , где  $B$  – набор вариантов структуры алгоритмов.

6.  $Z / \psi_B^{(A)} \alpha = f_{\alpha\beta} (z \phi_\beta^{(A)}(\alpha))$ ,  $\alpha \in E^{(A)}$  – управление функционирования, где  $Z / \psi_B = z_0$  – исходные данные.

7.  $\alpha \in \lambda$ , где  $\lambda$  – множество вариантов структуры логической схемы задач.

$$8. \pi(\varphi_B^{(A)}(\alpha)) = \varphi_\alpha^{(3)}(H(\alpha)), \quad \pi(\psi_B^{(A)}(\alpha)) = \psi_\alpha^{(3)}(H(\alpha)),$$

$\forall \alpha \in E^{(A)}$  – условие согласованности вариантов структур алгоритма проектирования и логических схем задач,  $(H, \pi)$  – эпиморфизм  $\Sigma^{(A)}$  на  $\Sigma^{(3)}$ .

Формальная постановка задачи системной оптимизации следующая:

вводим обозначение

$$J(k) = \begin{cases} J_{\text{кф}}(z(k)), k \in W_\beta \\ \sum_{\alpha \in E^{(A)}} T_{\alpha\beta}(k), k = m+1, \dots, m+K, \\ L_\beta \frac{T_{\alpha\beta}}{h_{\alpha\beta} \left( \sum_{\alpha \in E^{(P)}} \zeta(\alpha) \right)}, K = P. \end{cases}$$

Постановка задачи системной оптимизации в функции предикат

$$\chi(k) = \begin{cases} 1, \text{ если } (J(k)) \underset{\chi}{\leq} V(J(k) - \text{extr}) V(J(k) \in \chi(k)), \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi = \bigwedge_{k=1}^P \chi(k).$$

Общее условие системной оптимизации, предложенное В.М. Глушковым и развитое в работах В.С. Михалевича, В.Л. Волковича, А.А. Тимченко, имеет вид:

$$\Delta \Rightarrow 1.$$

Критерий является обобщенным системным требованием к целевым показателям и ресурсам создаваемый ИАСУ.

Задача динамической оптимизации [5] классически определяется двумя основными факторами:

- показателем эффективности или целевой функцией  $J(\bar{x})$ , где  $\bar{x}$  – вектор управляемых переменных;
- множеством ограничений на переменные  $g_1, x_2, \dots, x_n$  в виде равенств и неравенств, т.е.  $g_i : f_i(\bar{x}) \leq b_i$ , определяющих множество значений  $\bar{x}$

$$\Omega = \bigcap_{i=1}^k r_i.$$

Требуется оптимизировать  $J(\bar{x})$  по  $x$  на множестве  $\Omega$

$$\text{opt} J(\bar{x}) = J(\bar{x}^{(0)}).$$

Если  $(J(x))$  и  $\Omega$  во времени неизменны, то имеем дело с задачами статической оптимизации.

При изменении  $J(\bar{x})$  и  $\Omega$  во времени возникает задача динамической оптимизации

$$\text{opt}_{x \in \Omega} J_t(\bar{x}) = J_t(\bar{x}_t^{(0)}).$$

Применительно к задаче повышения (управления) системной эффективностью функционирования АО пространство деятельности авиапредприятий может быть представлено для реализации требуемых свойств при ограничениях на ресурсы. Высеченный параллелепипед определяет направление исследований в категориях свойств, аспектов деятельности и ресурсов (этапов ЖЦ). Отграниченное пространство определяет внутренние свойства систем и комплексов АО с целевой функцией ее программированной эксплуатации в будущем.

Показатели надежности: отказоустойчивость авионики и АО –  $P_{отк.АО}(t)$ , живучесть – вероятность того, что система не попадет в условия опасных внешних воздействий  $P_{ОВВ}(t)$ , отказобезопасность –  $P_{ЭФ}(t)$  целесообразно выразить через внутренние свойства авионики и АО (архитектура систем, режимы полёта, особые полётные ситуации), тогда эффективность функционирования может быть оценена логическим произведением составляющих

$$\chi^* = [\chi_1^* \wedge \chi_2^* \wedge \chi_3^*]$$

Значения  $\chi_1^*, \chi_2^*, \chi_3^*$  соответствуют уровням особых лётных ситуаций (усложненным условиям полета, сложной ситуации, аварийной ситуации, катастрофической ситуации) по отдельному или совокупному эффекту.

Между надежностью функционирования конечного звена в безопасности полётов «экипаж – ВС - среда» - отказобезопасностью  $P_{ЭФ}(t)$  и отказоустойчивостью авионики и её элементов –  $P_{отк.ав}(t)$  существует нечетко выраженная корреляционная связь, носящая нелинейный характер. Это вполне объяснимо трудностью установления зависимости влияния отказов авионики и её элементов на характеристики «экипаж – ВС - среда», «экипаж – авионика» на уровне графа [1], в который необходимо ввести новый элемент логики  $P_{н.отк.ав}^*, \chi_4^*$

Множество технических состояний авионики и АО (15...20), особых внешних возмущений и эргатические возможности системы «экипаж – ВС - среда» преобразуются через аналитические выражения эффективности функционирования сложных систем и через логические условия в виде функций предикат  $\chi_i^*(\chi_1^*, \chi_2^*, \chi_3^*, \chi_4^*)$ . Эти преобразования для аддитивных систем авионики имеют вид:

1. Для аддитивных систем АО:

$$\chi_1(t) = \begin{cases} 1,0, & \text{если } \sum_{i=1}^n P_{li}(H_i)\Phi_i(t) \geq \sum_{i=1}^n E_{опс}^*(t, p), \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\chi_2(t) = \begin{cases} 1,0, & \text{если } \sum_{j=1}^m P_{2j}(H_j)\Phi_j(t) \geq \sum_{j=1}^m E_{опс}^*(t, p), \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\chi_3(t) = \begin{cases} 1,0, & \text{если } \sum_{l=1}^L P_{3l}(H_l)\Phi_l(t) \geq \sum_{l=1}^L E_{опс}^*(t, p), \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\chi_4(t) = \begin{cases} 1,0, & \text{если } \sum_{l=1}^L P_{3l}(H_l, p(t))\Phi^{(l)}(t) \geq \sum_{l=1}^L E_{опс}^*(t, p), \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

где  $E_{опс}^*(t, p)$ ,  $E_{опс}(t, p)$  – соответственно нормативная и фактическая эффективность функционирования, относящиеся к опасным полётным ситуациям (ОПС);  $p$  – шкала градации ОПС;  $H_i$  – техническое состояние АО;

2. Для функционально-резервированных систем авионики и АО:

– при одновременной работе каналов:

$$\chi_1(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n [P_{1i}(H_i)] [1 - (1 - \Phi_i(t))^v] \geq \sum_{i=1}^n E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_2(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{j=1}^m [P_{2j}(H_j)] [1 - (1 - \Phi_j(t))^v] \geq \sum_{j=1}^m E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_3(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L [P_{3l}(H_l)] [1 - (1 - \Phi_l(t))^v] \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_4(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L [P_{3l}(H_l, p(t))] [1 - (1 - \Phi_l^{(1)}(t))^v] \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

– при выполнении каналами задачи в разные моменты времени

$$\chi_1(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \left[ 1 - \sum_{i=1}^n P_{1i}(H_i) \Phi_i(t)^v \right] \right\} \geq \sum_{i=1}^n E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_2(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{j=1}^m \left\{ 1 - \left[ 1 - \sum_{j=1}^m P_{2j}(H_j) \Phi_j(t)^v \right] \right\} \geq \sum_{j=1}^m E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_3(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L \left\{ 1 - \left[ 1 - \sum_{l=1}^L P_{3l}(H_l) \Phi_l(t)^v \right] \right\} \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_4(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L \left\{ 1 - \left[ 1 - \sum_{l=1}^L P_{3l}(H_l) \Phi_l^{(1)}(t)^v \right] \right\} \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

3. Для многофункциональных систем авионики и АО:

– с отказавшим каналом ( $\Phi_{\Sigma} \neq 1$ ):

$$\chi_1(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n P_{1i}(H_i) \Phi_i \prod_{k=1}^{b-1} Q_b \geq \sum_{i=1}^n E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_2(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{j=1}^m P_{2j}(H_j) \Phi_j \prod_{k=1}^{b-1} Q_b \geq \sum_{j=1}^m E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_3(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L P_{3l}(H_l) \Phi_l \prod_{k=1}^{b-1} Q_b \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p), \\ & 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_4(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L P_{3l}(H_l) \Phi_1^{(1)} \prod_{k=1}^{b-1} Q_b \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

– при выполнении режимов работы группой каналов:

$$\chi_1(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n [P_{1i}(H_i) - P_{1i}(H_{i-1})] \Phi_i \geq \sum_{i=1}^n E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_2(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{j=1}^m [P_{2j}(H_j) - P_{2j}(H_{j-1})] \Phi_j \geq \sum_{j=1}^m E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_3(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L [P_{3l}(H_l) - P_{3l}(H_{l-1})] \Phi_l \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_4(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L [P_{3l}(H_l) - P_{3l}(H_{l-1})] \Phi_l^{(1)} \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

– при выполнении системой  $p$  частных задач и структурно находящейся в  $n$  несовместных состояниях:

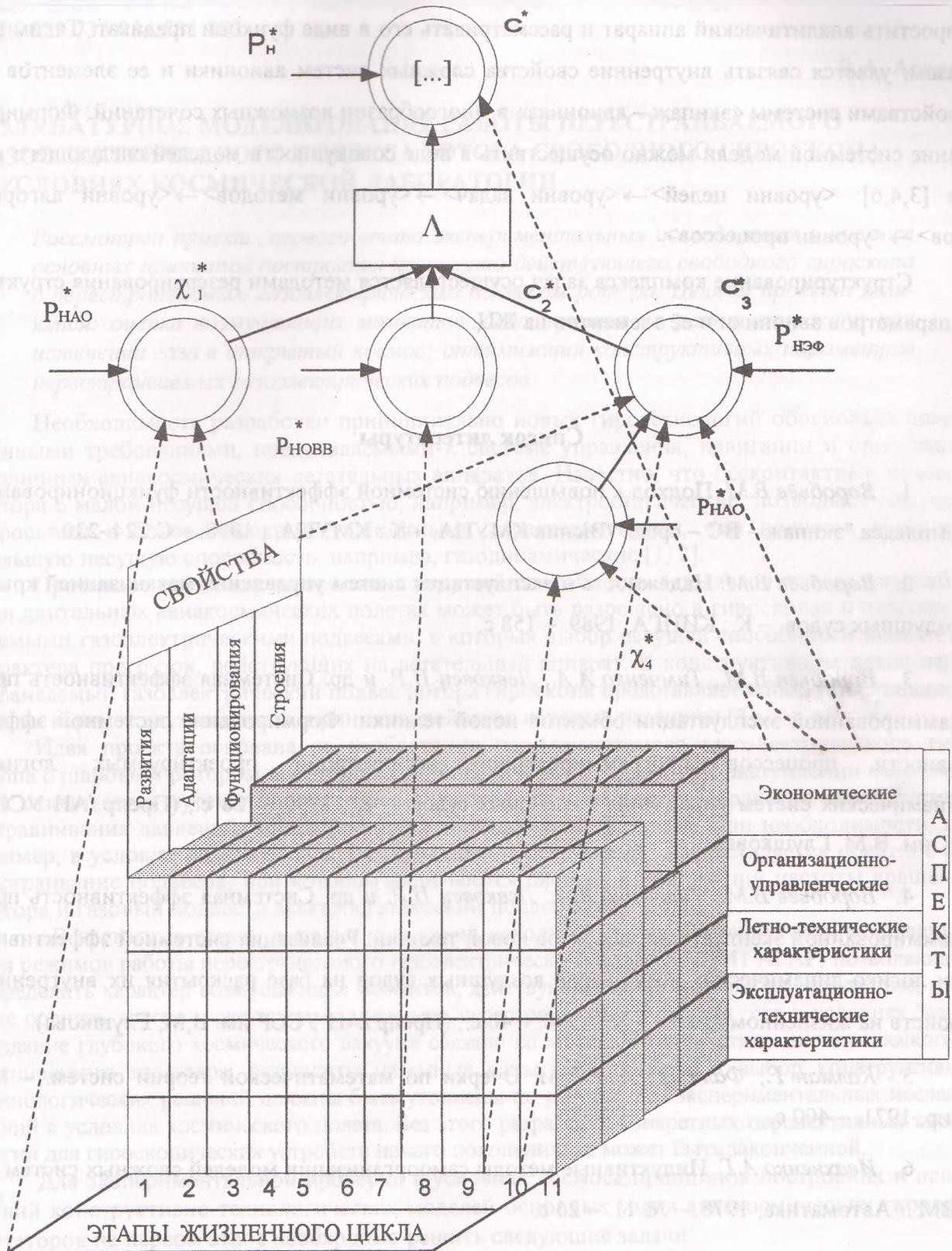
$$\chi_1(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{\eta=1}^p \sum_{i=1}^n P_{\eta} P_{1i}(H_i) P_{\eta}(A/H_i) \geq \sum_{i=1}^n E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_2(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{\eta=1}^p \sum_{j=1}^m P_{\eta} P_{2j}(H_j) P_{\eta}(A/H_j) \geq \sum_{j=1}^m E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_3(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{\eta=1}^p \sum_{l=1}^L P_{\eta} P_{3l}(H_l) P_{\eta}(A/H_l) \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\chi_4(t) = \begin{cases} 1, 0, & \text{если } \sum_{\eta=1}^p \sum_{l=1}^L P_{\eta} P_{3l}(H_l) P_{\eta}^{(1)}(A/H_l) \geq \sum_{l=1}^L E_{\text{опс}}^*(t, p) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

"Дерево" критериев системной оптимизации свойств логико-динамических систем, изображенное на рисунке, позволяет раскрыть методологию системного подхода,



"Дерево критериев" системной эффективности функционирования комплекса "экипаж - ВС - среда": Этапы жизненного цикла: 1 - замысел; 2 - обоснование технического задания на проектирование; 3 - проектирование АО; 4 - эксплуатационные опережающие стендовые испытания; 5 - макетирование; 6 - заводские летные испытания; 7 - государственные летные испытания; 8 - серийное производство; 9 - развертывание серийного производства; 10 - летная эксплуатация АО и ВС; 11 - техническая эксплуатация авионики и ВС

упростить аналитический аппарат и рассматривать его в виде функции предикат. Таким образом, удастся связать внутренние свойства сложных систем авионики и ее элементов со свойствами системы «экипаж – авионика» в многообразии возможных сочетаний. Формирование системной модели можно осуществить в виде совокупности моделей следующего вида [3,4,6]: <уровни целей> → <уровни задач> → <уровни методов> → <уровни алгоритмов> → <уровни процессов>.

Структурирование комплекса задач осуществляется методами резервирования структур и параметров авионики и её элементов на ЖЦ.

### Список литературы

1. Воробьев В.М. Подход к повышению системной эффективности функционирования комплекса "экипаж – ВС – среда" / Вісник КМУЦА. – К.: КМУЦА, 1998. – С.224–230.
2. Воробьев В.М. Надёжность и эксплуатация систем управления механизацией крыла воздушных судов. – К.: КИИГА, 1989. – 158 с.
3. Воробьев В.М., Тимченко А.А., Левковец П.Р. и др. Системная эффективность программированной эксплуатации объектов новой техники: Формирование системной эффективности процессов программированной эксплуатации проектируемых логико-динамических систем управления воздушных судов. – К.: 1990. – 28 с., (Препр./АН УССР, ИК им. В.М. Глушкова).
4. Воробьев В.М., Тимченко А.А., Левковец П.Р. и др. Системная эффективность программированной эксплуатации объектов новой техники: Реализация системной эффективности логико-динамических комплексов воздушных судов на базе раскрытия их внутренних свойств на жизненном цикле. – К.: 1990. – 40 с., (Препр./АН УССР им. В.М. Глушкова).
5. Калман Г., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 400 с.
6. Ивахненко А.Г. Индуктивные методы самоорганизации моделей сложных систем на ЭВМ // Автоматика, 1978. – № 11. – 26 с.

Стаття надійшла до редакції 28 грудня 1999 року