

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ДИСКРЕТНОГО СИНТЕЗА АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ИХ ФОРМАЛИЗОВАННОГО МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Владимир Дмитриевич СТЕПАНОВ родился в 1964 г. в городе Екабпилсе Латвийской ССР. Начальник отдела ФГУ «30 ЦНИИ Минобороны России». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области системного анализа, формирования технического облика авиационных комплексов. Автор более 150 научных работ. E-mail: svd1964@rambler.ru

Vladimir D. STEPANOV, Ph.D., was born in 1964 in Ecabpils, Latvian SSR. He is the Head of a Section at the 30th Central Research Institute in the MoD of Russia. His research interests are in system analysis and conceptual design of aircraft complexes. He has published more than 150 scientific works. E-mail: svd1964@rambler.ru

Рассматриваются задачи оптимального синтеза авиационных комплексов из конечного множества альтернативных подсистем. Предложены постановка и методика решения задачи на основе определения оптимальной декомпозиции АК на группы сильно связанных подсистем. Даются основные положения методики морфологического анализа авиационного комплекса.

Optimal synthesis problems are considered for aircraft complexes assembled from units belong to a finite set of alternative subsystems. A statement and solution technique are suggested for the synthesis problem basing on optimal decomposition of the aircraft complex into groups of closely linked subsystems. Main principles are suggested to analyze morphologically the aircraft complex. Simulation results are presented as applies to a foundation of conventionally optimal updating ways for hypothetical aircraft complex of tactical aviation.

Ключевые слова: авиационный комплекс, синтез, подсистема, боевая эффективность, стоимость, время разработки, оптимизация.

Key words: aircraft complex, synthesis, subsystem, combat effectiveness, cost, development time, optimization.

В практике военно-научных исследований (ВНИ) по обоснованию требований к авиационным комплексам (АК) достаточно часто возникают задачи, при решении которых АК представляется в виде дискретной системы, т.е. системы с дискретными переменными и дискретными параметрами [1]. Это, прежде всего, задачи по обоснованию оптимальных направлений модернизации АК, обоснованию требований к АК промежуточных этапов создания, обоснованию множества критических технологий в интересах реализации новых свойств АК и др. При решении подобных задач облик планера соответствует облику исходного (базового) варианта АК, а значения исследуемых характеристик должны принадлежать дискретному множеству альтернативных вариантов подсистем, предлагаемых к включению в состав АК:

$$\bar{X} = \bigcup_{i=1}^I \bar{X}_i, \quad \bar{X}_i = \{x_{ij}\}, \quad x_{ij} \in X_i, \quad j = \bar{1}, \bar{J}_i, \quad (1)$$

где \bar{X} — множество допустимых значений исследуемых характеристик АК;

\bar{X}_i — множество альтернативных вариантов i -й подсистемы;

X_i — пространство функциональных характеристик i -й подсистемы;

x_{ij} — характеристики j -го варианта i -й подсистемы;

I — множество подсистем АК, рассматриваемых в ходе исследований;

J_i — количество альтернативных вариантов i -й подсистемы.

В этих условиях задача обоснования требований интерпретируется как дискретная задача оптимального синтеза АК, которую при исследовании авиационного комплекса в пространстве показателей «эффективность — стоимость — время» в общем виде можно сформулировать следующим образом:

для заданных условий применения z^* определить такие оптимальные характеристики АК x^0 , которые

при удовлетворении ограничений на сроки разработки и стоимость АК обеспечивали бы максимум его эффективности при выполнении множества расчетных задач:

$$x^0 = \arg \max_{x \in X} W(x, z^*) \quad (2)$$

при следующих условиях:

$$T_{\text{ОКР}}(x) \leq T_{\text{ОКР}}^*;$$

$$C_{\text{ОКР}}(x) \leq C_{\text{ОКР}}^*;$$

$$C_{\text{СЕР}}(x) \leq C_{\text{СЕР}}^*;$$

$$z^* \in Z,$$

где W — показатель эффективности АК;

$T_{\text{ОКР}}(x)$ и $T_{\text{ОКР}}^*$ — фактическое и заданное время завершения опытно-конструкторской разработки (ОКР) АК;

$C_{\text{ОКР}}(x)$ и $C_{\text{ОКР}}^*$ — фактическая и заданная стоимость ОКР АК;

$C_{\text{СЕР}}(x)$ и $C_{\text{СЕР}}^*$ — фактическая и заданная средняя стоимость серийного производства АК;

Z — условия применения АК.

Физический смысл показателя эффективности должен соответствовать предназначению АК и адекватным образом отражать его потребительские качества. Основная сложность при этом заключается в оценке эффективности многофункциональных АК, нацеленных на решение разнородных задач. В этом случае предполагается использование показателей, отражающих эффективность АК при решении совокупности различных задач. При исследовании АК военного назначения таким показателем может быть боевой потенциал АК, при получении которого используются хорошо зарекомендовавшие себя методы эквивалентирования разнородного ущерба, наносимого противнику [2, 3].

Задача (2) имеет следующие характерные особенности:

- с учетом большого разнообразия альтернативных вариантов подсистем задача (2) представляет собой дискретную задачу оптимизации большой размерности. Особенности подобных задач являются отсутствие аналитических зависимостей между исследуемыми характеристиками и целевой функцией и функциями ограничений, дискретный и нелинейный характер зависимостей, а также многоэкстремальный, как правило, вид целевой функции;

- облик планера, соответствующий облику базового (исходного) варианта АК, при рассмотрении альтернативных вариантов подсистем не будет меняться существенным образом. Поэтому задача синтеза технического облика АК в классической постановке при проведении исследования не решается. Речь идет об оптимальном комплексировании АК из конечного множества альтернативных вариантов подсистем и об уточнении его летно-технических характеристик по сравнению с базовым (исходным) вариантом.

Если решение непрерывных задач оптимизации технического облика АК в ходе ВНИ осуществляется с использованием различных численных методов локальной и глобальной оптимизации, то дискретная оптимизация проводится, как правило, на основе методов перебора. Это существенно затрудняет просмотр всех допустимых решений и определение оптимального при наличии дисциплинирующих условий, а также ведет к значительным затратам вычислительных и исследовательских ресурсов. Одним из возможных путей решения данной проблемы может быть снижение размерности задачи (2) за счет ее декомпозиции, предполагающей представление исходной задачи в виде серии задач меньшей размерности. В формализованном виде декомпозиция всегда основывается на придании целевой функции и функциям ограничений специального вида (как правило, аддитивного или мультипликативного) [4]. Однако в практике ВНИ АК в настоящее время декомпозиция авиационного комплекса основывается на представлениях исследователей об иерархическом делении АК как большой технической системы на подсистемы и элементы [2,3]. В результате морфологическое описание АК всегда следовало из его функционального описания без анализа силы связей между подсистемами и элементами АК. В настоящей методике для придания целевой функции и функциям ограничений специального вида предлагается перейти от морфологического описания АК, основанного на интуитивных представлениях исследователей о его структуре, к обоснованию оптимальной декомпозиции АК с использованием формализованной методики морфологического анализа, предусматривающей оценку степени связности между подсистемами АК.

В этом случае решение задачи (2) разбивается на четыре основных этапа:

- определение степени взаимозависимости подсистем АК с точки зрения их влияния на выбранную функцию отклика;
- решение задачи агрегирования, в ходе которой множество подсистем АК разбивается на сильно связанные группы;

- военно-экономическая оценка вариантов групп подсистем АК;
- непосредственное решение задачи (2) в дискретной постановке.

Выполнение первых двух этапов исследования осуществляется с помощью разработанной методики формализованного морфологического анализа АК, результатом которого является декомпозиция авиационного комплекса на группы сильно связанных подсистем. Декомпозиция в данном случае предполагает игнорирование взаимозависимости между подсистемами, входящими в разные группы.

При решении задачи (2) судить о взаимозависимости подсистем в составе авиационного комплекса необходимо с точки зрения их совместного влияния на время разработки, стоимость АК и эффективность его боевого применения. При этом взаимозависимость проявляется в изменении влияния некоторой подсистемы на данные показатели при изменении характеристик других подсистем.

Рассмотрим три показателя в отдельности. Относительно времени разработки с учетом высокой автономности составных частей ОКР АК с большой достоверностью можно утверждать, что потребное время разработки некоторой подсистемы практически не будет зависеть от времени разработки других подсистем АК. Время разработки АК при этом будет определяться временем разработки подсистемы с наибольшей продолжительностью ОКР.

Как уже было отмечено, облик планера при решении задачи (2) не будет меняться существенным образом. Поэтому, опираясь на ту же аргументацию об автономности составных частей ОКР, можно утверждать, что потребная стоимость разработки и производства некоторой подсистемы практически не будет зависеть от стоимости разработки и производства других подсистем АК. Себестоимости опытно-конструкторской разработки и серийного производства, определяемые калькуляционным методом, будут являться при этом аддитивными функциями соответствующих стоимостей подсистем.

Однако для показателя эффективности АК вышеприведенные заключения в общем случае несправедливы. Например, общеизвестно, что вклад комплекса РЭП в эффективность боевого применения АК существенно зависит от уровня его РЛ заметности, вклад управляемых средств поражения существенно зависит от характеристик обзорно-прицельных систем и т.д. Подсистемы АК с точки зрения влияния на эффективность боевого применения находятся во взаимозависимости, уровень которой определяется значениями характеристик подсистем, задач и условий боевого применения.

Таким образом, о взаимозависимости подсистем в составе АК при решении задачи (2) достаточно судить с точки зрения их совместного влияния на показатель эффективности W . С целью оценки этого влияния в методике проводится исследование допустимой области решений, которая определяется следующим образом:

$$X' = \bigcup_{i=1}^I X'_i, \quad X'_i \subset X_i, \quad X' \subset X; \quad (3)$$

$$X'_i = \bigcup_{d=1}^{D_i} [x_{i \min}^d, x_{i \max}^d];$$

$$x_{i \min}^d = \min_{j=1, J_i} (x_{ij}^d);$$

$$x_{i \max}^d = \max_{j=1, J_i} (x_{ij}^d),$$

где $X = \bigcup_{i=1}^I X_i$ — пространство функциональных характеристик АК;

x_{ij}^d — значение d -й характеристики j -го варианта i -й подсистемы АК;

D_i — мощность пространства функциональных характеристик i -й подсистемы АК.

В дальнейшем для упрощения записей некоторую характеристику АК будем обозначать как x_η , понимая под ней некоторую d -ю характеристику i -й подсистемы x_i^d , причем $\eta = \overline{1, D}$, $D = \sum_{i=1}^I D_i$.

В соответствии с разработанной методикой между каждой парой характеристик x_η и x_φ , $x_\eta, x_\varphi \in X$; $\eta, \varphi = \overline{1, D}$ устанавливается отношение связности при помощи коэффициента связности $\Gamma_{\eta\varphi}$, значение которого определяется следующим образом:

$$\Gamma_{\eta\varphi} = \frac{|\Delta W_{\eta\varphi}^R - \Delta W_{\eta\varphi}^A|}{W(x_{\text{БАЗ}})}$$

$$\Delta W_{\eta\varphi}^R = W(x_{\eta \max}, x_{\varphi \max}, X''_{\eta\varphi}) - W(x_{\eta \min}, x_{\varphi \min}, X''_{\eta\varphi});$$

$$\Delta W_{\eta\varphi}^A = W(x_{\eta \max}, x_{\varphi \min}, X''_{\eta\varphi}) + W(x_{\eta \min}, x_{\varphi \max}, X''_{\eta\varphi}) - 2 \cdot W(x_{\eta \min}, x_{\varphi \min}, X''_{\eta\varphi}); \quad (4)$$

$$X''_{\eta\varphi} = \{x_{\lambda \min} \mid \lambda = \overline{1, D}, \lambda \neq \eta, \varphi\},$$

где $x_{\text{БАЗ}}$ — характеристики базового (исходного) варианта АК.

Алгоритм (4) фактически является алгоритмом «проверки на аддитивность» показателя эффективности W . Коэффициент связности, определяемый при помощи данного алгоритма, указывает, насколько реальное изменение показателя эффективности при изменении характеристик x_η и x_ϕ от минимальных до максимальных значений ($\Delta W_{\eta\phi}^R$) будет отличаться от ожидаемого изменения показателя W при выдвижении гипотезы об аддитивном характере его изменения при изменении характеристик x_η и x_ϕ ($\Delta W_{\eta\phi}^A$).

Построение плана эксперимента по алгоритму (4) для всех характеристик позволяет получить матрицу связности

$$R = \|\|r_{\eta\phi}\|\|, \quad \eta, \phi = \overline{1, D}, \quad (5)$$

отражающую степень связности подсистем в составе АК.

Наличие матрицы связности R позволяет перейти к следующему этапу исследования по морфологическому анализу АК, который заключается в агрегировании сильно связанных характеристик АК по различным группам.

При группировании характеристик необходимо, чтобы:

- в состав каждой группы входили характеристики, агрегировано наиболее связанные;
- характеристики с сильными связями не попадали в разные группы;
- суммарная сложность группы не выходила за рамки заданных пределов.

Указанные требования позволяют интерпретировать задачу декомпозиции АК как обобщенную задачу таксономии [5], которая в настоящей методике в формализованном виде представляется следующим образом:

определить такое разбиение множества X на Ξ групп Y_ξ , которое обеспечивало бы максимум суммы взвешенных средних величин связи внутри каждой группы подсистем

$$Y^0(D, \Xi^0) = \arg \max_{Y(D, \Xi) \in Y(D, \Xi_1, \Xi_2)} F[Y(D, \Xi)] \quad (6)$$

при следующих условиях:

$$\Xi_1 \leq \Xi \leq \Xi_2,$$

$$(x_\eta, x_\phi) \in \overline{U}_0 \text{ для } \forall x_\eta, x_\phi \in Y_\xi, \quad \xi = \overline{1, \Xi},$$

где $Y(D, \Xi) = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_\Xi\}$ — множество полных разбиений исходного множества X на Ξ непересекающихся подмножеств;

$Y(D, \Xi_1, \Xi_2)$ — множество возможных решений;

Ξ_1, Ξ_2 — ограничения на количество групп характеристик;

\overline{U}_0 — ограничения связности, не допускающие распределения характеристик одной подсистемы по разным группам;

$$F = \frac{1}{\Xi} \sum_{\xi=1}^{\Xi} \left[\frac{2}{|Y_\xi|(|Y_\xi| - 1)} \sum_{\substack{x_\eta, x_\phi \in Y_\xi \\ x_\eta \neq x_\phi}} r_{\eta\phi} \right] \text{ — функционал}$$

связности.

Как следует из постановки, задача (6) представляет собой задачу целочисленного программирования большой размерности. В разработанной методике предлагается представление ее в виде серии задач меньшей размерности, которые решаются по схеме ветвлений, изображенной на рис. 1.

В соответствии с предложенной схемой на каждом уровне ветвления решается задача оптимального разбиения множества X на Ξ подмножеств, количество которых соответствует уровню ветвления. При этом используются результаты оптимального агрегирования, полученные на предыдущем уровне. Ветвление продолжается до уровня, номер которого соответствует верхнему ограничению Ξ_2 на количество групп. Уровень, на котором обеспечивается максимальное значение функционала F , дает оптимальное решение задачи (6).

При поиске оптимального решения по схеме ветвлений на каждом уровне для каждого множества решается задача (6) при условии $\Xi_1 = \Xi_2 = 2$, т.е. оптимального разбиения множества Y_ξ ровно на два подмножества. Для решения этой задачи множество Y_ξ представляется в виде неориентированной сети $G(Y_\xi, R)$, узлы которой соответствуют характеристикам АК $x \in Y_\xi$ (рис. 2). Пропускная способность каждой дуги (x_η, x_ϕ) в данной сети определяется величиной коэффициента связности $r_{\eta\phi}$. Тогда задача оптимального разбиения множества Y_ξ ровно на два подмножества может быть сведена к задаче о максимальном потоке в многополюсной сети $G(Y_\xi, R)$. Минимальный разрез в сети (Y_{ξ_1}, Y_{ξ_2}) между любыми двумя ее узлами бу-

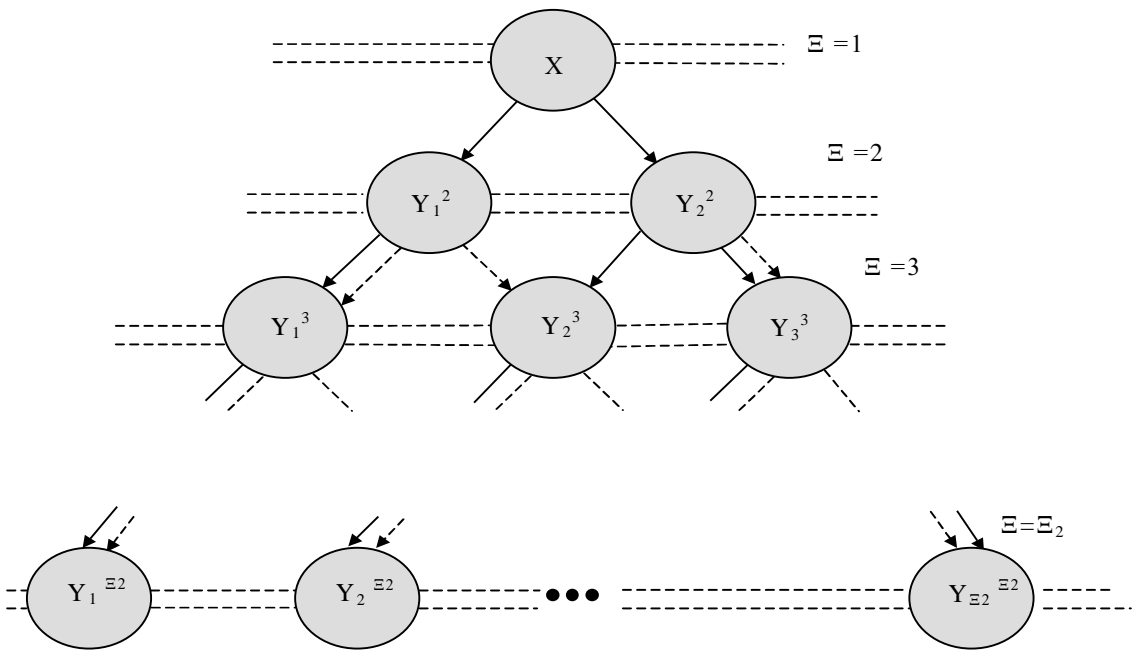


Рис. 1. Схема ветвлений в процессе агрегирования характеристик АК

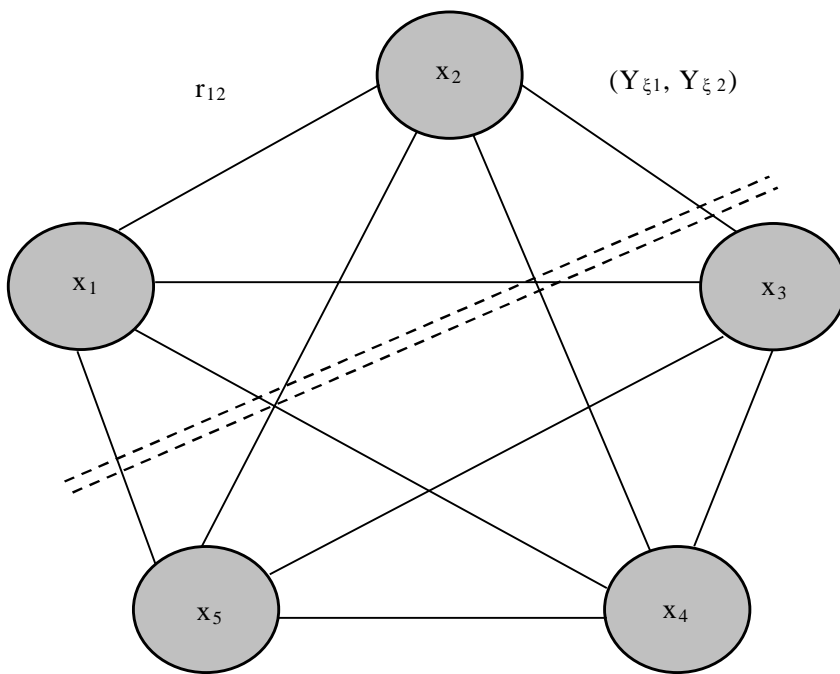


Рис. 2. Представление характеристик АК в виде сети

дет определять решение задачи (6) при условии, что эти узлы находятся в разных группах.

Задача о максимальном потоке в многополюсной сети в настоящей методике решается при помощи методов сжатия узлов [6] и расстановки пометок [6–8]. С использованием данных методов строится дерево разрезков, при помощи которого можно легко найти величины максимальных потоков между всеми парами узлов, составляющих ис-

ходную сеть. Анализ полученного дерева разрезков позволяет определить минимальный разрез в многополюсной сети. Важно отметить, что пропускная способность этого минимального разреза

$$C(Y_{\xi 1}, Y_{\xi 2}) = \sum_{\substack{x_{\eta} \in Y_{\xi 1} \\ x_{\varphi} \in Y_{\xi 2}}} r_{\eta\varphi} \quad (7)$$

характеризует степень связности групп подсистем Y_{ξ_1}, Y_{ξ_2} .

Таким образом, результатом решения задачи (6) является оптимальное разбиение множества X на Ξ^0 подмножеств $Y_{\xi}^0, \xi = \overline{1, \Xi^0}$, являющееся, по сути, оптимальной декомпозицией АК на группы сильно связанных подсистем, поскольку с учетом выполнения ограничений связности всегда можно записать

$$Y_{\xi}^0 = \bigcup_{i|X_i^d \in X_i, Y_{\xi}^0} X_i. \quad (8)$$

Показатель

$$\Theta[Y(D, \Xi)] = \frac{\sum_{\xi_1=1, \Xi} \sum_{\xi_2=1, \Xi} \sum_{\substack{x_{\eta} \in Y_{\xi_1} \\ x_{\varphi} \in Y_{\xi_2}}} r_{\eta\varphi}}{\sum_{\substack{\eta, \varphi=1, D \\ \eta \neq \varphi}} r_{\eta\varphi}} \quad (9)$$

дает представление о том, какой объем информации (в относительном виде) о взаимозависимости подсистем АК теряется при данной декомпозиции в случае игнорирования потоков связности между группами характеристик. Если

$$\Theta \leq \delta, \quad (10)$$

где δ — необходимая точность решения задачи дискретного синтеза, то потоками связности между группами подсистем можно пренебречь из практических соображений; если же условие (10) не выполняется, то необходимо подняться на более высокий уровень схемы ветвления и выбрать более укрупненный вариант агрегирования характеристик АК ($\Xi < \Xi^0$).

После определения оптимальной декомпозиции АК вполне обоснованным будет принятие допущения о независимости групп сильно связанных подсистем Y_{ξ} и аддитивном характере изменения показателя W и функций ограничений при включении в состав АК подсистем из различных групп. В результате оказывается возможным решить задачу (2) посредством комбинированного использования методов перебора и методов дискретной оптимизации.

Для реализации данного подхода для каждой группы с учетом совместимости вариантов подсистем в составе АК формируется множество альтернативных вариантов реализации сильно связанных подсистем:

$$\overline{Y}_{\xi} = \{y_{\xi\phi}^0\}, \quad \phi = \overline{1, \Phi_{\xi}},$$

$$y_{\xi\phi} = \{x_{ij} | x_{ij} \in \overline{X}_i, X_i \subset Y_{\xi}^0, i \in [1, I], j \in [1, \overline{J}_i]\}, \quad (11)$$

$$\Phi_{\xi} \leq \prod_{i|X_i \subset Y_{\xi}^0} J_i,$$

где Φ_{ξ} — количество возможных вариантов реализации ξ -й группы подсистем АК.

Для каждого альтернативного варианта $y_{\xi\phi}$ осуществляется оценка влияния группы подсистем на эффективность и технико-экономические показатели АК. При этом используются научно-методический аппарат технико-экономической оценки и научно-методический аппарат оценки эффективности авиационных комплексов в соответствии с их предназначением.

В результате каждому варианту реализации групп сильно связанных подсистем $y_{\xi\phi}$ ставится в соответствие множество показателей

$$\{T_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi\phi}), \Delta C_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi\phi}); \Delta C_{\text{СЕР1}}^{\xi}(y_{\xi\phi}), \Delta W^{\xi}(y_{\xi\phi}, z^*)\}, \quad (12)$$

где $T_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi\phi})$ — срок завершения ОКР ϕ -го варианта ξ -й группы подсистем;

$\Delta C_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi\phi})$ — изменение стоимости ОКР АК по сравнению с базовым (исходным) вариантом АК при внедрении ϕ -го варианта ξ -й группы подсистем;

$\Delta C_{\text{СЕР1}}^{\xi}(y_{\xi\phi})$ — изменение средней стоимости серийного производства АК;

$\Delta W^{\xi}(y_{\xi\phi}, z^*)$ — изменение эффективности АК при решении совокупности расчетных задач.

Тогда с учетом декомпозиции АК на группы сильно связанных подсистем задачу (2) можно записать в следующем виде:

$$x^0 = \{y_{\xi}^0\} = \arg \max_{y_{\xi} \in \overline{Y}_{\xi}, \xi=1, \Xi^0} \left[W(x_{\text{БАЗ}}, z^*) + \sum_{\xi=1}^{\Xi^0} \Delta W^{\xi}(y_{\xi}, z^*) \right] \quad (13)$$

при следующих условиях:

$$C_{\text{ОКР}}(x_{\text{БАЗ}}) + \sum_{\xi=1}^{\Xi^0} \Delta C_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi}) \leq C_{\text{ОКР}}^*;$$

$$C_{\text{СЕР}}(x_{\text{БАЗ}}) + \sum_{\xi=1}^{\Xi^0} \Delta C_{\text{СЕР}}^{\xi}(y_{\xi}) \leq C_{\text{СЕР}}^*;$$

$$\max_{\xi=1, \Xi^0} [T_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi})] + \Delta T \leq T_{\text{ОКР}}^*;$$

$$z^* \in Z,$$

где ΔT — минимальное время, необходимое для завершения испытаний АК после завершения разработки всех его подсистем;

y_{ξ}^0 — оптимальный вариант ξ -й группы подсистем.

Представление критерия и дисциплинирующих условий в виде аддитивных функций позволяет применить пошаговую процедуру оптимизации с использованием метода динамического программирования [9—11]. Его применение в данном случае сводится к решению функционального уравнения

$$f_{\xi}(C_{\text{ОКР}}^{\xi}, C_{\text{СЕР}}^{\xi}) = \max_{y_{\xi} \in Y_{\xi}} \left[f_{\xi-1}(C_{\text{ОКР}}^{\xi} - \Delta C_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi}), C_{\text{СЕР}}^{\xi} - \Delta C_{\text{СЕР}}^{\xi}(y_{\xi})) + \Delta W^{\xi}(y_{\xi}, z^*) \right] \quad (14)$$

при условиях

$$C_{\text{ОКР}}^{\xi} = C_{\text{ОКР}}^{\xi-1} + \Delta C_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi}) \leq C_{\text{ОКР}}^*;$$

$$C_{\text{СЕР}}^{\xi} = C_{\text{СЕР}}^{\xi-1} + \Delta C_{\text{СЕР}}^{\xi}(y_{\xi}) \leq C_{\text{СЕР}}^*;$$

$$T_{\text{ОКР}}^{\xi}(y_{\xi}) + \Delta T \leq T_{\text{ОКР}}^*;$$

$$\xi = \overline{1, \Xi^0}, \quad f_0 = W(x_{\text{БАЗ}}, z^*);$$

$$C_{\text{ОКР}}^0 = C_{\text{ОКР}}(x_{\text{БАЗ}}), \quad C_{\text{СЕР}}^0 = C_{\text{СЕР}}(x_{\text{БАЗ}}).$$

Решение уравнения (14) позволяет получить оптимальный технический облик АК, создание которого возможно при заданных стоимости и сроках разработки.

Таким образом, разработана оригинальная методика дискретного синтеза авиационных комплексов, основанная на их формализованном морфологическом анализе. Основным достоинством пред-

лагаемого научно-методического аппарата по сравнению с применяемым в практике военно-научных исследований АК является его высокая производительность. Используемые методы и приемы позволяют при приемлемых затратах вычислительных ресурсов сформировать представительные результаты, охватывающие все пространство возможных обликовых решений в зависимости от располагаемых сроков и затрат на создание перспективной авиационной техники.

Библиографический список

1. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1990.
2. *Платунов В.С.* Методология системных военно-научных исследований авиационных комплексов. — М.: Изд-во «Дельта», 2005.
3. *Барковский В.И., Скопец Г.М., Степанов В.Д.* Методология формирования технического облика экспортно ориентированных авиационных комплексов / Под ред. В.И. Барковского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
4. *Цурков В.И.* Декомпозиция в задачах большой размерности. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981.
5. *Рубинштейн Н.И.* Оптимальная группировка взаимосвязанных объектов. — М.: Наука, 1989.
6. *Ху Т.* Целочисленное программирование и потоки в сетях. — М.: Издательство «МИР», 1974.
7. *Майника Э.* Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: Пер. с англ. — М.: МИР, 1981.
8. *Андельсон-Вельский Г.М., Диниц Е.А., Карзанов А.В.* Поточковые алгоритмы. — М.: Наука, 1975.
9. *Алексеев О.Г.* Комплексное применение методов дискретной оптимизации. — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат лит., 1987.
10. *Сигал И.Х., Иванова А.П.* Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы: Учеб. пособие. — М.: Физматлит, 2002.
11. *Ковалев М.М.* Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование. — М.: Эдиториал УРСС, 2003.

ФГУ «30 ЦНИИ Минобороны России»
Статья поступила в редакцию 14.08.2009