

**МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СБОРКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

© 2013 С.Ф. Глустенко

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 30.05.2013

Переход к бесплазовому способу производства летательных аппаратов на базе электронных моделей изделий должен обеспечиваться автоматизацией процессов анализа, синтеза и оценки на порядок возросшего числа проектируемых в автоматизированных системах вариантов технологических процессов сборки. Разработана методика совершенствования способов построения состава, структуры и схем технологической подготовки для повышения экономических показателей сборочного производства по комплексам варьируемых факторов.

Ключевые слова: комплексный критерий, агрегирующая функция, сборка, автоматизация, итерационные процедуры, проектирование, точность, взаимозаменяемость, технологические процессы, маршруты, методы, способы, базирование, моделирование.

Эффективность производства летательных аппаратов (ЛА) характеризуется рядом критических и существенных параметров и показателей, однако их множество не всегда позволяет дать оценку эффективности производства в целом, поскольку значения одних показателей могут характеризовать рост эффективности нового варианта по сравнению с базовым, в то время как значения других показателей, наоборот, на снижение эффективности по другой группе критериев. Поэтому для интегральной оценки эффективности необходимо оценить эффективность в целом. В качестве первого этапа для получения интегральной оценки рассмотрим построение на исходном множестве критериев дерева критериев. С учетом большого числа (десятки и сотни) числа критериев эффективности для расчета интегрального критерия целесообразно применять иерархический подход к их классификации. Самый нижний уровень образуют единичные, или локальные критерии, которые характеризуют эффективность лишь по одному параметру. Последующие уровни дерева составляют локальные комплексные критерии с вершиной в виде комплексного (интегрального) критерия (корень дерева), по которому оценивается эффективность объекта в целом (рис. 1).

Для каждого критерия  $K_j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ) установим область определения:

$K_{j,i}$  – наименее предпочтительное из допустимых значение критерия;

$K_j^*$  – наиболее предпочтительное значение.

Таким образом, каждый критерий изменяется в интервале  $[K_{j,i}; K_{j,m}^*]$ .

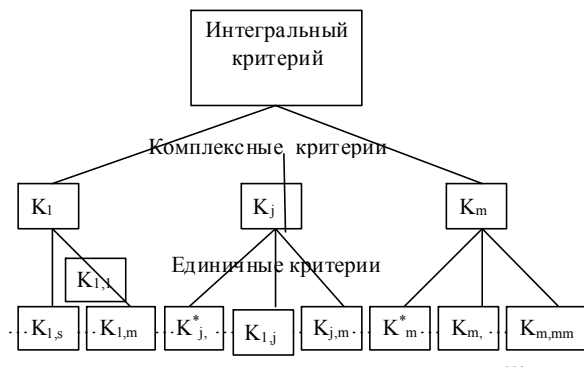


Рис. 1. Схема дерева критериев эффективности варианта ТС сборки ЛА

Функция полезности  $U(K_1, \dots, K_m)$  изменяется в интервале  $[0,1]$ , причем  $U(K_1, \dots, K_m) = 0$ , а  $U(K_1^*, \dots, K_m^*) = 1$ .

Введем дополнение критерия  $K_j$  в виде подмножества критериев  $\bar{K}_j = \{K_1, \dots, K_{j+1}, \dots, K_m\}$  для определения полилинейной функции полезности на основе следующих определений.

**Определение 1.** Критерий  $K_j$  независим по эффективности от своего дополнения  $\bar{K}_j$ , если функция эффективности представляется в виде

$$U(k_j, \bar{K}_j) = U(\bar{K}_j, k_j) + b(\bar{K}_j)U(k_j, \bar{K}_j), \quad (1)$$

где  $b(\bar{K}_j)$  – функция от дополнения  $\bar{K}_j$ .

Содержательный смысл формулы (1) заключается в построении функции полезности в зависимости от одного критерия  $K_j$ , которая является условной функцией полезности при фиксированном дополнении.

Условная функция  $U(k_j, \bar{K}_j)$  изменяется в интервале  $[U(k_j, \bar{K}_j); U(k_j^*, \bar{K}_j)]$ , включает подмножества  $U(k_j^*, \bar{K}_j)$ ,

Глустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: titan250@mail.ru

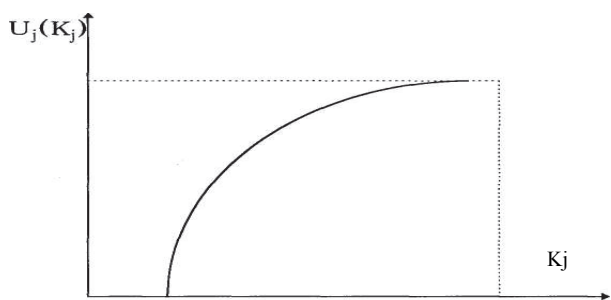


Рис. 2. Условная функция эффективности от одного критерия для варианта ТС АСП

$$U_j(K_j, \bar{K}_j^1), K_j \cup (K_j, \bar{K}_j^2).$$

Перейдем к другой условной функции полезности, поменяв значение критериев, входящих в дополнение, на  $\bar{K}_j = \bar{K}_j^2$ . На рис. 3 изображена условная функция полезности с интервалом изменения

$$[U_j(\bar{K}_j^1, \bar{K}_j^2); U_j(K_j^1, \bar{K}_j^2)]. \quad (2).$$

Зависимость (2) означает, что две любые условные функции полезности связаны между собой положительным линейным преобразованием.

$$\begin{aligned} \text{Действительно: } U_j(K_j, \bar{K}_j^1) &= \\ &= U_j(\bar{K}_j^1, \bar{K}_j^1) + b(\bar{K}_j^1) U_j(K_j, \bar{K}_j^1) U_j(K_j). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_j(K_j, \bar{K}_j^2) &= U_j(\bar{K}_j^2, \bar{K}_j^2) + \\ &+ b(\bar{K}_j^2) U_j(K_j, \bar{K}_j^2); \end{aligned}$$

Откуда

$$U_j(K_j, \bar{K}_j^2) = \alpha \bar{K}_j^1 U_j(K_j, \bar{K}_j^1) + \beta, \quad (3)$$

где  $\alpha = \beta(\bar{K}_j^2) / b(\bar{K}_j^1)$ ;  $\beta = U_j(K_j, \bar{K}_j^2) - \alpha U_j(K_j, \bar{K}_j^1) U_j(K_j)$ .

С учетом вышеприведенной интерпретации условия (3) проверка независимости эффективности критерия от своего дополнения состоит в следующем. Необходимо зафиксировать дополнение,

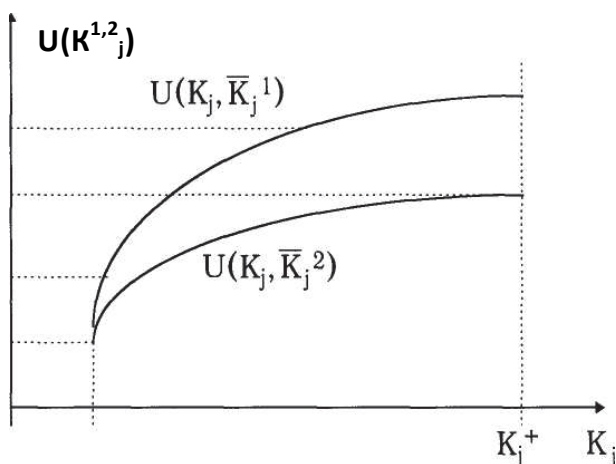


Рис. 3. Условная функция эффективности от двух критериев для варианта ТС АСП

например,  $\bar{K}_j^1$ , и построить условную функцию полезности от одного критерия, приняв

$$U_j(K_j, \bar{K}_j^1) = 0, \text{ а } U_j(\bar{K}_j^+, \bar{K}_j^1) = 1.$$

Такая функция является нормированной условной функцией эффективности, отражающей результат от изменения предпочтения для многокритериальной оценки объекта при изменении только одного критерия. Тогда, поменяв значения критериев, входящих в дополнение, на  $\bar{K}_j^2$ , вновь построим нормированную условную функцию. Если эта функция не изменяется при изменении дополнения, то выполняется условие независимости эффективности критерия от его дополнения [1]. Так как нормированная условная функция эффективности не зависит от  $K_j$ , обозначим ее как  $U_j(K_j)$ .

Анализ полилинейной функции (3) показал, что при большом числе критериев  $m$  требуется определение значительного числа коэффициентов, для определения которых, в свою очередь, требуется некоторое множество оценок, а при  $m > 4$  её практическое использование затруднено.

Поэтому для анализа и оценки сложных ТС сборки ЛА сформулируем условия существования мультипликативной функции эффективности. Для этого введем следующее определение понятия независимости критериев по предпочтению.

**Определение 2.** Критерий  $K_j$  независим по предпочтению от своего дополнения  $\bar{K}_j$ , если порядок многокритериальных объектов в последовательности, образованной изменением  $K_j$  и фиксированном дополнении  $\bar{K}_j^1$ , не зависит от значений критериев, входящих в дополнение (1):

$$U_j(K_1, K_2) \cup V_1 \cup (K_1) + V_2 \cup (K_2) + (1 - V_1 - V_2) \cup (K_1) \cup (K_2), \quad (4)$$

где  $V_1, V_2$  – коэффициенты для дополнения  $\bar{K}_j$ , которые могут быть представлены в табл. 1.

Сравнивая понятия независимости по полезности и по предпочтению, можно сделать вывод, что из независимости по полезности следует независимость по предпочтению.

**Определение 3.** Пара критериев  $K_j$  и  $K_i$  независима по предпочтению от своего дополнения  $\bar{K}_{j,i}$ , если порядок объектов в последовательности, образованной изменением  $K_j$  и  $K_i$  и фиксированном дополнении  $\bar{K}_j^1$ , не зависит от значений критериев, входящих в дополнение (1).

**Определение 4.** Критерии  $K_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) взаимно независимы по эффективности от своего дополнения, если параметры функции эффективности не взаимосвязаны при отражении структуры ТС по рангу предпочтений.

Для автоматизации процессов анализа и получения оценок проектов перспективных ТС сборки ЛА введем понятие базиса, или системы  $V = \{A_j | j \in K_j\}$ , состоящей из  $m$  линейно независи-

Таблица 1. Формирование массива критериев эффективности проекта ТС АСП

Оцениваемые объекты	$K_1$	$K_2$	$K_m$	Оценки объектов
$V^+$	$K_1^+$	$K_2^+$	...	1,0
$V^1$	$K_1^+$	$\bar{K}_2$	...	$V_1$
$V^2$	$\bar{K}_1$	$K_2^+$		$V_2$
...	...	...	...	...
$V^m$	$\bar{K}_1$	$K_2^+$	...	$V_m$

мых столбцов матрицы  $A$ . Индекс  $ij$  присвоим множеству базисных номеров оценок  $K_j$ . Тогда в алгебраическом смысле в сборочном пространстве система  $V$  является базисом пространства критериев  $E^m$ . В частности, любой вектор из  $E^m$  единственным образом может быть разложен по базисным столбцам. Пусть  $X^0$  базисное решение по заданным критериям. Следовательно, число элементов  $|J(x^0)|$  множества  $J(x^0)$  не превосходит  $m$ , поскольку система столбцов  $\{A_j | j \in J(x^0)\}$  линейно независима. Если  $|J(x^0)| = m$ , то решение  $x^0$  является невырожденным, но в противном случае (при  $|J(x^0)| < m$ ) – вырожденным. Соответственно, невырожденному базисному решению  $x^0$  соответствует единственный базис оценок  $V = \{A_j | j \in J(x^0)\}$ . Для вырожденного базисного решения линейно независимую систему столбцов  $\{A_j | j \in J(x^0)\}$  можно дополнить до базиса  $V = \{A_j | j \in J\}$ ,  $J(x^0) \in J$ . Вырожденным базисным решениям может соответствовать несколько базисов. Если задача связана с решением линейной системы уравнений, то матрица системы уравнений  $(AJ_m)$ , образующих основные ограничения, может быть задана в диагональной форме, но в этом случае решение  $x^{(i)}$  – базисное с множеством базовых номеров вида  $J^{(i)} = \{n+1, \dots, n+m\}$ .

Указанные зависимости и построение соответствующих функций эффективности с учетом построения дерева критериев позволяют получать достаточно объективные интегральные оценки эффективности структуры и работы технологической системы сборки ЛА и ее подсистем.

Так как интегральные оценки основаны на иерархическом подходе к классификации критериев эффективности, то единичные критерии необходимо структурировать в виде дерева критериев; критерий самого верхнего уровня дерева является интегральным критерием оценки эффективности. Затем следует проводить агрегирование критериев по дереву с использованием агрегирующих функций (функций эффективнос-

ти). Параметры функции эффективности определяются управляющим звеном, принимающим решения, и отражают его структуру предпочтений.

Следует отметить, что такой подход позволяет построить модель технологической системы сборки в виде ориентированного графа, а после расчета комплексных критериев итерационной процедурой может возникнуть необходимость дополнить структуру критериев новыми или исключить из нее некоторые критерии, изменить параметры функций полезности.

Реализация предложенной методики анализа и оценки ТС сборки ЛА для оценки надежности её функционирования может быть проведена на базе графа ТС сборки с введением двух или более вариантов критериев, где плотность графа определится как фактическое максимальное число смежных вершин (кликное число) при максимальной связности вершин всего графа. В целом при нахождении всех максимально независимых системных множеств графа критериев с наибольшим числом вершин эффективно использование метода последовательного перебора независимых множеств с одновременной проверкой каждого множества на максимальность путем добавления к исследуемому множеству дополнительной, не принадлежащей ему вершины и выяснения условий сохранения устойчивости с последующим запоминанием оптимальных множеств. Использование данного метода связано с тем, что с увеличением числа вершин увеличивается объем вычислений за счет возрастания числа максимальных независимых множеств. Но вместе с тем большое число сформулированных независимых множеств удаляется из результата решений, так как они содержатся в других множествах, полученных ранее, и становятся не максимальными на данном этапе решения. Для снижения объема вычислений в этом случае применим систематический метод перебора, снижающий объем вычислений, и не требуется запоминания генерируемых независимых мно-

жеств с целью проверки их на максимальность способом сравнения с ранее сформулированными множествами. Решение конкретной задачи обеспечения устойчивости системы сборки по критериям оптимизации схем и качества поставок деталей и комплектующих на сборку включает:

- алгоритм решения задач об оптимальном начальном запасе и графиках поставок на сборку по критерию минимума среднего запаса;
- алгоритм определения практического приближения к оптимальному управлению по качеству и надежности линии сборки.

При решении задачи в схемах управления запасами и поставками в детерминированной постановке считаем, что оперативный график работы сборочного производства определяем и может быть пересчитан в детерминированную интенсивность потребления элемента  $v(t)$  при  $0 \leq t \leq T$  на период планирования при фактическом состоянии начального запаса  $x(0) = x_0$  при условиях:

- 1)  $x(T) = x(0) = x_0$ ;
- 2)  $x(t) \geq 0$  при  $0 \leq t \leq T$ ;
- 3)  $u(t) \geq 0$  при  $0 \leq t \leq T$ ;
- 4)  $u(t) \leq U_m(t)$  при  $0 \leq t \leq T$ , (5)

где  $u(t)$  – интенсивность поставок элементов сборок;

$U_m(t)$  – ограничение сверху на интенсивность поставок элементов сборок, определяемая интенсивностью их производства цехами – поставщиками. Допустим, что для существования хотя бы одного допустимого  $u(t)$ , удовлетворяющего условию (1), требуется, чтобы

$$x_0 + \int_0^T U_m(t) \cdot dt \geq \int_0^T v(t) \cdot dt = V, \quad (6)$$

где  $V$  – общий объем поставок, при этом

$$\frac{dx}{dt} = U(t) - v(t) .$$

Тогда критерии оптимальности ( $K_1, K_2, \dots, K_j$ )  $\in \{X^-\}$ , имеющие определенный физический смысл, сформулируем в виде:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt \longrightarrow \min ; \quad (7)$$

$$\max_{0 \leq t \leq T} x(t) = \longrightarrow \min ; \quad (8)$$

$$\int_0^T \left| x(t) - \bar{x} \right|^2 \cdot dt \longrightarrow \min . \quad (9)$$

Для реализации интегральной методики оценки следует решить задачи оптимальных поставок элементов сборок по двум условиям:

- 1) надежность и устойчивость ТП должны соответствовать проектным показателям;

- 2) распределение заказов и схемы поставок обеспечивают как нормальную плановую работу цехов – поставщиков, так и необходимые объемы поставок элементов сборок в агрегатно-сборочные цехи.

Эти условия имеют важный производственно-экономический смысл в самолетостроительном производстве, где часто вводятся конструкторско-технологические или другие изменения, и часть неиспользуемого задела деталей отправляется в металлолом. Следовательно, для каждого из случаев (6), (7), (8) ищем минимум на множестве всех допустимых  $x_0(t)$  и  $w(t)$ ,  $0 \leq t \leq T$ .

Анализ показывает, что если решение (5) при  $x_0 = 0$  получено со знаком равенства, то критерий оптимальности по начальному запасу определяется по формуле:

$$x_0^* = - \min_{0 \leq t \leq T} \int_0^T |U_m(t) - v(t)| \cdot dt \geq 0. \quad (10)$$

Обозначим  $U^*(t)$  – фиксированное значение объема поставок  $U_m(t)$  на интервале в момент времени  $t$ ,  $0 \leq t \leq T$ .

Рассмотрим случай, когда (5) выполняется со знаком строгого неравенства. Тогда функция  $v(t)$  является кусочно – непрерывной, соответственно допустимое управление по  $U(t)$  определяется также в классе кусочно-непрерывных функций. Аналитическое представление оптимального запаса после преобразований расчетных формул имеет вид:

$$x_0^{**} = \max \left\{ 0, - \min_{0 \leq t \leq T} \int_0^T |U_m(t) - v(t)| \cdot dt \right\}. \quad (10)$$

Для расчета соответствующего оптимального управления по  $U^*(t)$  интервал  $[0, T]$  представим в виде дискретных отрезков со знакопостоянным значением функции  $w(t) = U_m(t) - v(t)$ .

Допустим,  $(a_i, b_i)$  – открытые множества, покрывающие  $[0, T]$  в количестве  $i_{\max}$ , на которых функция  $w(t) < 0$ .

Принимая, что  $w(0) > 0$ ,  $w(T) < 0$ , получаем:  $a_i = 0, b_i = c_i, d_{i-1} = a_i$  для всех  $i = 1, 2, \dots, i_{\max}$ , при этом  $d_{i_{\max}} = T$ .

Обозначив

$$A = \bigcup_{i=1}^{i_{\max}} (a_i, b_i), \quad C = \bigcup_{i=1}^{i_{\max}} (c_i, d_i), \quad (11)$$

Получим  $U^*(t) = U_m(t)$  для всех  $t \in C$  на множестве  $C$ .

Для изучения поведения  $U^*(t)$  на множестве  $A$  считаем, что начиная с некоторого номера  $i'$ , вид  $U^*(t)$  на интервалах  $(a_i, b_i), i = i', \dots, i_{\max}$  заранее известен. Тогда на интервале

( $a_{i-1}^*$ ,  $b_{i-1}^*$ ) при соотношении:

$$\int_{a_{i-1}^*}^{b_{i-1}^*} [U_m(t) - v(t)] \cdot dt < x_0^{**} + \int_{b_{i-1}^*}^T [v(t) - U^*(t)] \cdot dt \quad (12)$$

получим:

$$U^*(t) = U_m(t) \text{ для } t \in (a_{i-1}^*, b_{i-1}^*). \quad (13)$$

В противном случае решение уравнения (12) относительно  $t$  представим:

$$\int_{a_{i-1}^*}^{b_{i-1}^*} [U_m(\tau) - v(\tau)] \cdot d\tau < x_0^{**} + \int_{b_{i-1}^*}^T [v(t) - U^*(t)] \cdot dt. \quad (14)$$

Рассмотрим решения уравнения для  $t_{i-1}^*$ , когда ( $a_{i-1}^* < t_{i-1}^* < b_{i-1}^*$ ).

Для этого случая оптимальное управление на интервале ( $a_{i-1}^*$ ,  $b_{i-1}^*$ ) будет иметь вид:

$$U^*(t) = \begin{cases} v(t), & \text{если } a_{i-1}^* < t \leq t_{i-1}^* \\ U_m(t), & \text{если } t_{i-1}^* < t < b_{i-1}^* \end{cases} \quad (15)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные аналитические представления дискретных управлений на всех подмножествах интервала  $[0, T]$  обеспечивают информационную базу принятия решений по результатам анализа и оценки текущей информации для состав-

ления и корректировки оптимального графика поставок  $U^*(t)$  и построения вариативных алгоритмов решения задачи об оптимальном начальном запасе и разработке графика планово-диспетчерского обеспечения поставок элементов сборок в агрегатный цех по задаваемому интегральному критерию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусева Р.И., Вялов А.В. Теоретические основы сборки самолёта: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО "КНАГТУ", 2005.
2. Обработка конструкции деталей на технологичность методами математического моделирования производства [под ред. В. В. Павлова]. М.: ВНИИНМАШ, 1982.
3. Волошин Г.Я. Методы оптимизации в экономике: Учебное пособие. М.: "Издательство "Дело и сервис", 2004. 320 с.
4. Пекари А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А. и др. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов. М.: Аграф-пресс, 2006. 304 с.
5. Ачуев Н.Р., Давыдов Ю.В., Андришин В.М., Суоров В.И., Сухоруков Р.В. Управление качеством на всех этапах жизненного цикла авиационной техники // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение [Гл. редактор А.Г. Братухин]. М.: ОАО "НИЦ АСК", 2008. 608 с.
6. Судов Е.В., Левин А.И., Петров А.В., Чубарова Е.В. Технология интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения. М.: ООО Издательский дом "ИнформБюро", 2006. 232 с.

## TECHNIQUE OF RECEIVING INTEGRATED ESTIMATES OF EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF ASSEMBLY OF AIRCRAFT

© 2013 S.F. Tlustenko

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Transition to a besplazovy way of production of aircraft on the basis of electronic models of products has to be provided with automation of processes of the analysis, synthesis and an assessment of much increased number of options of technological processes of assembly projected in automated systems. The technique of improvement of ways of creation of structure, structure and schemes of technological preparation is developed for increase of economic indicators of assembly production on complexes of varied factors.

Keywords: the complex criterion, aggregating function, assembly, automation, iterative procedures, design, accuracy, interchangeability, technological processes, routes, methods, ways, basing, modeling.

Information about authors: