

Методы оптимизации последовательности выполнения технологических процессов сборки ЛА с учетом ресурсных ограничений

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Изложены результаты разработки методов оптимизации графиков сборки конструкций летательных аппаратов при ресурсных ограничениях, вызванных технологическими и организационными причинами. Получены аналитические зависимости для определения возможных потерь времени на сборку. Показано, что максимальная длительность сборки изделий отличается от минимальной величины в зависимости от числа видов используемых ресурсов и не зависит от количества сборочных операций, что позволяет, варьируя ресурсами, получить наиболее оптимальный по длительности график сборки.

Ключевые слова: сборка конструкций ЛА, график сборки изделий, ресурсные ограничения, оптимизация последовательности сборки.

Инженерные решения, принимаемые на этапах технологической подготовки производства летательных аппаратов (ЛА), являются результатом большого комплекса работ, представляющих собой многоуровневый процесс поиска возможных альтернативных вариантов и выбора из их числа оптимальных вариантов технологии и организации сборки, практической реализации их в производстве.

При этом требование значительного сокращения времени на освоение и серийное производство ЛА, при одновременном выполнении условия уменьшения затрат на подготовку производства, обуславливает необходимость изыскания методов и средств автоматизации инженерного труда с привлечением для этой цели средств вычислительной техники.

Одной из актуальных проблем в области сборки ЛА является определение рациональной последовательности построения и выполнения операций технологических процессов сборки.

Технологические процессы сборки ЛА многовариантны и допускают факториальное количество различных последовательностей выполнения сборочных операций с большой степенью независимости их выполнения в пространстве и во времени. Строгие ограничения на последовательность сборки накладываются лишь характером геометрических связей в местах сопряжения сборочных единиц.

Технологические и организационные ограничения вводятся как необходимые для выполнения специфических требований производства. Эти ограничения всегда связаны с технико-экономическими показателями производства, т.е. имеют вид ресурсных ограничений.

Для того, чтобы стало возможным автоматизировать процесс поиска оптимальной последовательности сборки, необходимо разработать формализованную модель, которая в достаточной степени была бы адекватна реальному процессу с учетом необходимых ограничений.

Формализованная модель последовательности сборки может быть построена на представлении конструкции ЛА в виде множества элементов

(деталей и комплектующих изделий), а для описания отношений их соединения в процессе сборки может быть использована сетевая модель в виде графа сборки изделия J . Граф сборки должен отражать конструктивные, технологические и организационно-производственные ограничения.

Задача оптимизации графа сборки формулируется как определение допустимой последовательности выполнения операций сборки в смысле оптимальности ее по критериям: «используемые ресурсы» и «длительность цикла» сборки изделия J . Если среди допустимых последовательностей сборки есть такая, которая будет иметь наименьшую общую деятельность, то такой граф последовательности сборки считается оптимально допустимым.

Граф сборки $G(D,U)$ представляет собой набор вершин (D), которым предписаны свойства подборок (деталей и комплектующих изделий), и дуг (U), которым предписаны отношения (связи) между вершинами и длительности (t_i) образования связей. Удаление дуг графа в определенной последовательности означает, что выполняются все операции соединения подборок и образуется готовое изделие.

Таким образом, стягивание графа $G(D,U)$ в одну вершину характеризует процесс сборки изделия.

Задача разработки модели и метода оптимизации стягивания графа сборки зависит от характера ограничений на ресурсы, необходимые для выполнения технологического процесса сборки изделия:

- а) ресурсы не ограничены,
- б) ресурсы ограничены конструктивно-технологическими требованиями или производственными условиями.

В случае отсутствия ограничений на ресурсы (R) методика стягивания графа сборки $G(D,U)$ построена на основе принципа Беллмана [1], согласно которому время стягивания графа сборки определяется по зависимости:

$$T(G) = t_i + T(\Gamma_i) \quad (1)$$

где t_i – длительность выполнения операции q_i , выполняемой последней, $T(\Gamma_i)$ – подграфы графа G с числом дуг на единицу меньше предшествующих.

Из приведенной зависимости следует, что для определения $T(G)$ достаточно знать $T(\Gamma_i)$ для всех $\Gamma_i \subset G$ с числом дуг на единицу меньше. Следовательно, задача стягивания графа $G(D,U)$ заключается в построении линейного порядка графов Γ_i , согласованного с частичным порядком по включению, из числа которых принимается вариант, дающий $T(G) \Rightarrow \min$.

Методика оптимизации последовательности стягивания графа сборки при отсутствии ресурсных ограничений разработана и предложена в ранее опубликованной статье [2].

В случае ограничения по ресурсам использование принципа Беллмана затруднено, так как использование ресурсов необходимо рассматривать в зависимости от времени. Полное исследование в общем случае этой задачи является недоступным по числу выполняемых операций для массовой задачи. Поэтому для построения графов последовательности сборки $P(G,R)$ с ограничениями по используемым ресурсам R применены эвристические

алгоритмы, которые дают оценки близости полученных длительностей $T(P)$ и их минимальным значениям $T_0(P)$ [3].

Оптимизация $P(G, R)$ при ограничении числа видов используемых ресурсов возникает тогда, когда для сборки привлекаются исполнители разных профессий или разной квалификации в зависимости от характера и разновидности сборочных работ.

Рассмотрим четыре наиболее часто встречающихся варианта решения задачи.

1. Используются r_k единиц одного вида взаимозаменяемых ресурсов.

Задача решена для сборки и разборки (прямая и обратная задачи) графа $P(G, R)$.

Общая длительность $T(P)$ стягивания графа сборки изделия складывается из сумм длительности $t(\sigma)$ выполнения операций и потерь T_{np} , характеризующих неизбежные простои ресурсов, выделенных для сборки:

$$T(P) = \frac{1}{r} \sum_{\sigma_i} t(\sigma) + \frac{1}{r} T_{np} \quad (2)$$

Для определения последовательности сборки введены два правила: 1) при наличии готовых к стягиванию дуг в графе сборки ни одна из единиц ресурса не простаивает; 2) дуга готова к стягиванию, если вес возникающей звезды не превосходит $\max P(Z)$.

Под понятием «вес звезды $P(Z)$ » подразумеваем суммарную длительность, затраченную на стягивание дуг вершин звезды в вершину подграфа $P(t) = \sum_{\sigma_i} t(\sigma)$.

Алгоритм стягивания дуг графа G заключается в выполнении следующих шагов: применяя правила 1 и 2 и используя все r единиц ресурса, стягивают дуги графа G до момента τ_0 , в котором одна из r единиц ресурса скажется незагруженной. На образование подграфа G_{τ_0} потребуется не менее $r \max P(Z)$ времени. При этом до момента τ_0 простоев не будет, так как все r единиц ресурса заняты.

Удалением висячих дуг в графе G_{τ_0} получим подграф $G_{\tau_1} \subset G_{\tau_0}$, простои ресурса при этом будут превосходить значения $(r-1) \max P(Z)$. Повторяя шаги до полного стягивания оставшихся подграфов G_{τ_i} , суммарный простой ресурсов составит

$$T_{np} \leq (r-1) \max P(Z) + 2r(r-1) \max t(\sigma).$$

Таким образом, длительность построенного графа сборки изделия отличается от минимальной на величину не более

$$T_{np} \leq (2r-2) \max t(\sigma) + \frac{r-1}{r} \max P(Z) \quad (3)$$

Анализ полученных результатов построения графика сборки ресурса одного вида показывает, что длительность отличается от минимальной на значение, не зависящее от числа дуг в графе $G(D, U)$.

2. **Используются r_k единиц двух видов.** Последовательность сборки изделия в этом случае произведем следующим образом. Не уменьшая общности, считаем, что

$$\frac{1}{r_1} \sum_{\sigma \in G}^{(1)} t(\sigma) > \frac{1}{r_2} \sum_{\sigma \in G}^{(2)} t(\sigma),$$

где (1) и (2) означают суммирование длительностей по первому и второму ресурсам.

Для дуг разделяющего множества Γ , разбивающего граф G на два компонента K_1 и K_2 , введена функция $\Delta(K_1, \Gamma)$, равная

$$\Delta(K_1, \Gamma) = r \sum_{\sigma \in K_1}^{(1)} t(\sigma) - r \sum_{\sigma \in K_2}^{(2)} t(\sigma).$$

Далее строится (находится) такое множество Γ , для которого

$$|\Delta(K_1, \Gamma)| \leq \max(r_1, r_2) \max P(Z).$$

После построения множества Γ , делящего G на компоненты K_1 и K_2 (1-й шаг), множества Γ приводят к ресурсу одного вида (2-й шаг). Далее сборку графа G осуществляем по схеме:

3-й шаг. Анализируем, получилась ли одного вида оставшаяся часть множества дуг $\Gamma_{ост}$ в рассматриваемый момент. Если $\Gamma_{ост}$ – первого вида, то осуществляется переход к шагу 4, если же второго – переход к шагу 8.

4-й шаг. Удаляются множество дуг $\Gamma_{ост}$ и дуги второго вида из K_1 .

5-й шаг. Анализируется, остались ли дуги множества $\Gamma_{ост}$. Если остались, то осуществляется переход к следующему шагу, если нет – к шагу 12.

6-й шаг. Удаляются оставшиеся дуги множества $\Gamma_{ост}$ и дуги второго вида из K_2 .

7-й шаг. Анализируется, какие дуги еще остались. Если остались дуги $\Gamma_{ост}$, то осуществляется переход к шагу 8, если нет – к шагу 9.

8-й шаг. Удаляются оставшиеся дуги первого вида из K_1 и множества $\Gamma_{ост}$ и осуществляется переход к шагу «Выход из алгоритма».

9-й шаг. Удаляются дуги первого вида из K_1 , дуги второго вида из K_2 и осуществляется переход к шагу «Выход из алгоритма».

10-й шаг. Удаляются множества $\Gamma_{ост}$ и дуги второго вида K_2 .

11-й шаг. Удаляются дуги первого вида из K_1 , дуги второго вида из K_2 и осуществляется переход к шагу «Выход из алгоритма».

12-й шаг. Удаляются дуги первого вида из K_2 , дуги второго вида из K_1 и осуществляется переход к шагу «выход из алгоритма».

Для оценки общего времени сборки использована следующая лемма: если в граф-дереве D имеется путь $L = \{Z_n\}$ множества Γ , состоящее из звезд Γ_1 дуг первого вида, и звезд Γ_2 дуг второго вида, то для случаев:

а) $r_2 \sum_{\sigma \in \Gamma}^{(1)} t(\sigma) < r_1 \sum_{\sigma \in \Gamma}^{(2)} t(\sigma)$ простые T_{np} не превосходят значения:

$$(10 \max r_i - 3) \max t(\sigma) + 6 \max P(Z)$$

б) $r_2 \sum_{\sigma \in \Gamma}^{(1)} t(\sigma) > r_1 \sum_{\sigma \in \Gamma}^{(2)} t(\sigma)$ простые T_{np} не превосходят значения:

$$(10 \max r_i + (2r_i - 7) \max t(\sigma) + 11 \max P(Z)).$$

С использованием результатов леммы для оценки простоев T_{np} ресурсов при сборке G доказано, что простые будут наибольшими на наибольшем пути разборки G и не превосходят значения

$$T_{np} = (68 \max r_i - 22) \max t(\sigma) + 34 \max P(Z). \quad (4)$$

3. Используется r_k единиц ресурсов трех видов. Применив тот же подход, что и при решении задачи для двух видов, получено выражение для оценки простоев ресурсов при сборке G тремя видами, не превосходящее значение

$$T_{np} = (210 \max P(Z) + (408 \max r_i - 132) \max t(\sigma)). \quad (5)$$

4. Используются r_k единиц ресурсов n видов. Этот случай рассматривается как обобщающий, и для него справедлива следующая оценка длительности сборки изделия:

$$\max \frac{1}{r_i} \sum_{i=1}^n t(\sigma) \leq T(G, R) \leq \max \frac{1}{r_i} \sum_{i=1}^n (\sigma) + \left(\sum C_i + 0(r^4) \max P(Z) - 0(Z^4) \max t(\sigma) \right), \quad (6)$$

где $r = r_1 + r_2 + \dots + r_n$, $C_j \rightarrow j$ - е число Фибоначчи.

Построение последовательности сборки, удовлетворяющей неравенству (6), основано на результатах рассуждений и доказательств, принятых при решении задачи для $r_k = 2$, $r_k = 3$.

Рассмотренные варианты показывают, что максимальная длительность построенного графика сборки в случае ограничения ресурсов по видам отличается от минимальной на величину, не зависящую от числа операций сборки, а зависящую от структуры графа сборки и числа используемых видов ресурсов. Это позволяет, варьируя ресурсы и допустимую последовательность выполнения сборочных операций, построить оптимальный график сборки любого изделия.

Вывод

Изложенные теоретические основы решения задач оптимизации последовательности сборки с учетом ограничений по ресурсам позволяют достаточно корректно построить модель сборочного процесса и решить задачи автоматизированного проектирования оптимальной организации выполнения технологических процессов сборки и управления сборочным производством.

Список литературы

1. Иоффе А.Д, Тихомиров В.М., Теория экспериментальных задач. К. Наука, 1974
2. Бабушкин А.И., Башта А.Л., Белов И.С., Душин Б.И., Оптимизация последовательности сборки изделий. К. Автоматика и телемеханика АН СССР, №9, 1977, с 17-83
3. Бабушкин А.И. Моделирование и оптимизация сборки летательных аппаратов М.: Машиностроение, 1990. 240с

Поступила в редакцию 26.05.2016

Методи оптимізації послідовності виконання технологічних процесів складання ЛА з урахуванням ресурсних обмежень

Викладено результати розробки методів оптимізації графіків складання конструкцій літальних апаратів при ресурсних обмеженнях, викликаних технологічними і організаційними причинами. Отримано аналітичні залежності для визначення можливих втрат часу на складання. Показано, що максимальна тривалість зборки виробів відрізняється від мінімальної величини в залежності від числа видів використовуваних ресурсів і не залежить від кількості складальних операцій, що дозволяє, варіюючи ресурсами, отримати найбільш оптимальний по тривалості графік складання.

Ключові слова: збірка конструкцій ЛА, графік складання виробів, ресурсні обмеження, оптимізація послідовності складання.

Methods of Optimizing the Sequence of Technological Processes of Aircraft Assembly Taking into Account Resource Constraints

The results of the development of optimization methods for the assembly schedules aircraft constructions with resource constraints caused by technological and organizational reasons. Analytical dependence for determining the possible loss of time for the assembly. It is shown that the maximum duration of the assembly of products from a minimum value differs depending on the number and types of resources used independent of the number of assembly operations, which allows varying the resources to get the most optimal duration assembly schedule.

Keywords: assembly of aircraft structures, product assembly schedule, resource constraints, optimization of assembly sequence.

Сведения об авторах:

Бабушкин Александр Анатольевич – канд. техн. наук., доц. каф. финансов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина

Бабушкин Анатолий Иванович – д-р. техн. наук., проф. каф. экономической теории, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.