УДК 65.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ САМОЛЕТА ПО ФУНКЦИИ

© 2017 О.Ф. Соколова, М.И. Соколова, И.Н. Куликов

Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 29.09.2017

В данной статье рассматривается возможность оптимизации процессов сборки сложных изделий по временному параметру за счет представления операций сборки изделия в виде функций, образмеренных трудоемкостью, а последовательность их выполнения как последовательность стягивания дуг графа сопряжений.

Ключевые слова: процессы сборки самолета, операции сборки в виде функций, последовательность стягивания дуг графа сопряжений.

Рассмотрим объект – агрегат самолета под индексом *J*, который собирается из множества *N* деталей d_i. Связь между ними устанавливается графом сопряжений *G*(*N, E*). Вершины d_k и d_l соединены кривой (дугой) только тогда, если в агрегате *J* детали d_k и d_l непосредственно соединяются между собой. Каждой кривой (дуге) U_j графа *G* присовокупим число вида $t_j(s\ )$ – время образования соединения между деталями d_k и d_l. Здесь в общем случае это время зависит от того, какие детали уже соединены между собой к моменту образования соединения между деталями d_k и d_l [в математическом и физическом (теоретическом) смысле].

Выполнение операций сборки агрегата *J* соответствует *теоретической операции* стягивания кривых (дуг) комплексного графа *G*. Стягивание дуги U_j выполняется за время t_j. В частично стянутом графе могут появиться петли. Под *теоретической операцией* стягивания петли следует понимать удаление такой дуги из графа *G*. Полная сборка изделия (агрегата) *J* означает стягивание графа *G* в одну вершину.

Здесь задачу определения последовательности операций сборки изделия *J* можно представить как задачу определения последовательности стягивания дуг графа сопряжений.

Задачу стягивания графа *G* рассмотрим на примере фермы при следующих условиях и ограничениях:

1) задан неориентированный граф *G*;

2) каждой дуге U_jÎU приписано число t_j ³ *0* – время стягивания этой дуги;

3) в графе *G* одновременно могут стягиваться только не смежные между собой дуги. Следует отметить, что дуги, не смежные в исходном графе *G*, могут стать смежными в частично стянутом графе *G*. По условию, начиная с этого момента, дуги одновременно стягивать нельзя.

Условие несмежности одновременно стягиваемых дуг соответствует тому, что в данной задаче сборки каждый узел может одновременно соединяться не более чем с одной дугой узла. Здесь не будем учитывать другие технологические и ресурсные ограничения, накладываемые на последовательность выполнения операций сборки.

Итак, пусть необходимо собрать за минимальное время часть фермы (рис. 1), состоящую из четырех продольных балок, четырех распорок и одной корневой детали (основные фермы).

Распорка 5 соединена с балками 1 и 2, распорка 6 – с балками 2 и 3, распорка 7 – с балками 3 и 4, распорка 8 – с балками 4 и 1. Корневая деталь (узел) 9 соединяется со всеми балками. Граф сопряжения такого изделия изображен на рис. 1. Предположим, что все соединения осуществляются за время *t*. Логичной является симметричная последовательность сборки, при которой на первом шаге каждая балка соединя-

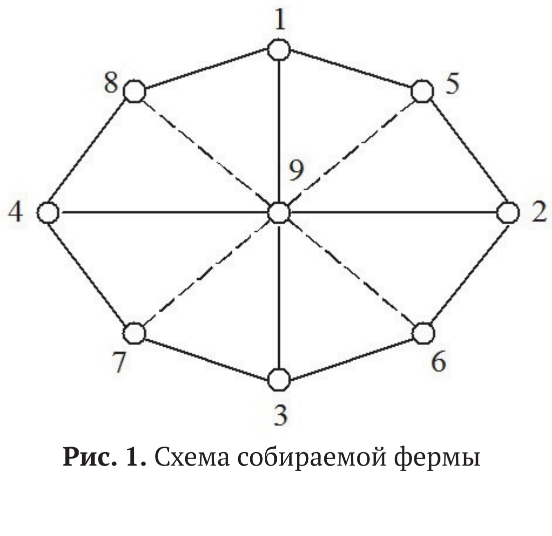

Рис. 1. Схема собираемой фермы

Соколова Ольга Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика, управление и информатика». E-mail: sokof1407@rambler.ru
Соколова Маргарита Ивановна, студент. E-mail: sokof1407@rambler.ru
Куликов Иван Николаевич, магистрант. E-mail: vanokul95@mail.ru

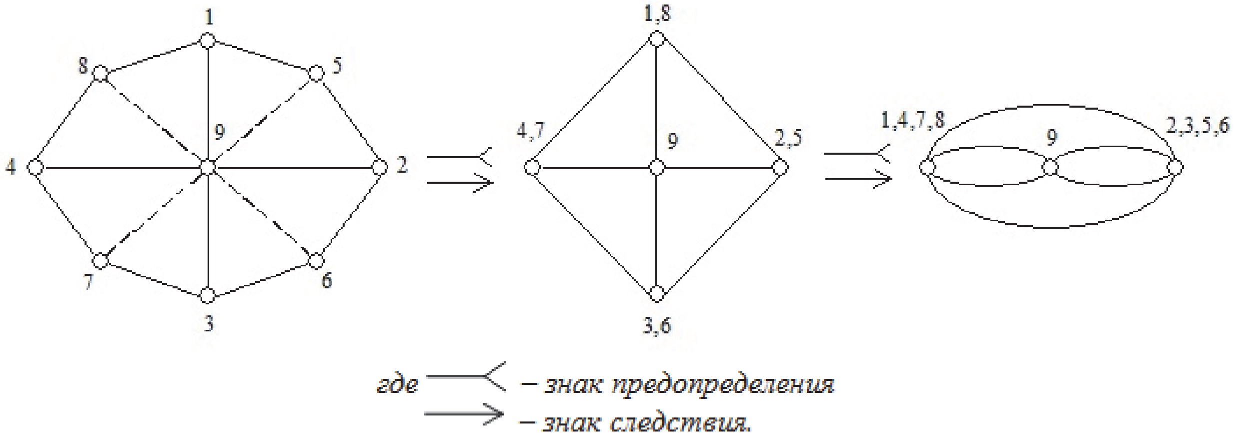

Рис. 2. Схема стягивания дуг графа собираемой фермы (вариант 1)

ется с распоркой; далее полученные узлы соединяются между собой и с основанием (рис. 2).

Общее время сборки равно восьми единицам. Однако если рассмотреть другие варианты сборки, то можно найти последовательность, изображенную на рис. 3., при которой общее время сборки равно лишь семи единицам.

Для указанных условий ограничений определим последовательность стягивания дуг, стягивающих граф *G* в точку за наименьшее время.

Пусть здесь *T*(*G*) – наименьшее время стягивания графа *G*. Тогда для задачи стягивания графа *G* необходимо определить время стягивания дуг:

$$T(G) = t_j + T(\Gamma_j), \qquad (1)$$

где *j* – индекс дуги, стягиваемой последней;

Γ_j – граф, получаемый из графа *G* удалением дуги U_j.

Дугу U_j, стягиваемую последней, назовем срединой графа *G*. Индекс средины обозначим φ(*G*). Граф может иметь несколько средин, как это показано, например, на рис. 4.

Здесь серединами будут дуги U_2 и U_4. Если средин несколько, то φ(*G*) – произвольный, но фиксированный индекс одной из средин. Совершенно очевидно, что граф Γ_j не всегда связанный.

Из выражения (1) следует, что для определения *T*(*G*) достаточно знать $T(\Gamma_j)$ для всех $\Gamma_j \subset G$ с числом дуг на единицу меньше, чем в *G*. Следовательно, задача стягивания графа *G* сводится к задаче построения линейного порядка подграфов Γ_j графа *G*, согласованного с их частичным порядком по включению. Тогда, если известны $T(\Gamma_j)$ для всех $\Gamma' < \Gamma$, то $T(\Gamma_j)$ находится с использованием принципа оптимальности Беллмана.

Ниже рассмотрим подробную реализацию предложенной схемы для задачи стягивания дерева.

Пусть $z_0, z_1, \dots, z_m$ – висячие вершины дерева графа (*G*). Пусть *L* – расстояния между вершинами *x* и *y* обозначим *L*(*x*, *y*), а число дуг пути (расстояния) *L* обозначим через модуль |*L*|. Будем считать, что *L*(*x*, *y*) = j. Обозначим через $L_K = L(z_0, z_K)$ путь, соединяющий вершины z_0 и z_K $(1 \le K \le m)$, а через

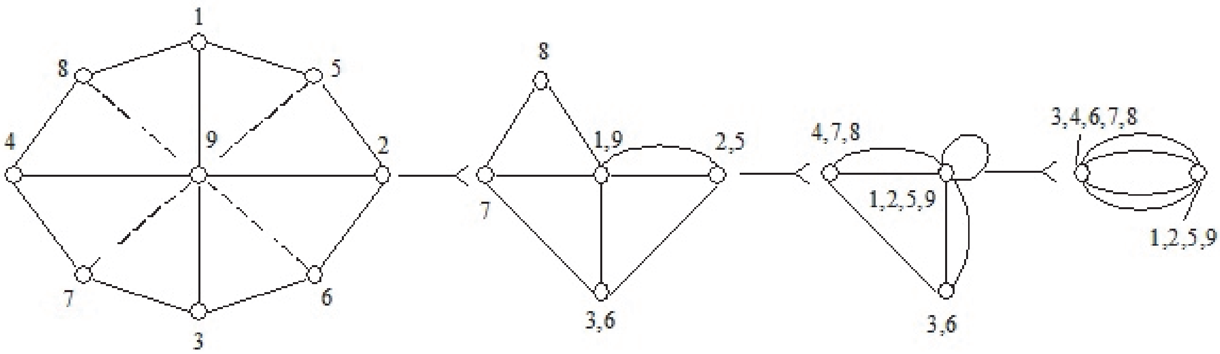

Рис. 3. Схема стягивания дуг графа собираемой фермы (вариант 2)

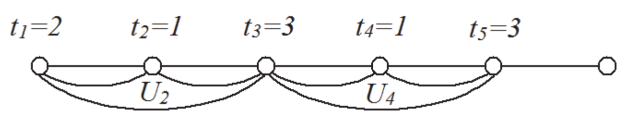

Рис. 4. Линейный граф, имеющий две середины (дуги U_2 и U_4)

$L_K = L(x_K, z_K)$ – часть пути (расстояния) L_K, не пересекающуюся с путями с меньшими индексами:

$$\widetilde{L}_K = \left(L_K \cap \bigcup_{r<K} L_r \right)\Bigg|_{\widetilde{L}_K} .$$

Очевидно, что

$$\widetilde{L}_{K1} \cap \widetilde{L}_{K2} = \varphi ,$$

$$k_1 \neq k_2 , \qquad (2)$$

$$\bigcup_{K=1}^{m} L_K = G$$

Индукцией по m устанавливается, что каждая вершина x дерева G, отличная от висячей, лежит внутри равенства одного пути $\widetilde{L}_p$. Так как вершины x_K отличны от висячих, то для всех $K > 1$существует единственное $w(K)$ – такое, что $x_K \in \widetilde{L}\omega(K)$ при [1 £ $w(K) < K$].

Пусть задано:

$$r_K = \left| L(x_K, z_K) \right|,$$

$$t_K = \left| L(x_{\omega(K)}, x_K) \right| .$$

Набор ($i_1, i_2, \ldots, i_{m+1}$) целых чисел назовем допустимым при условиях:

1. $\sum_{K=1}^{m} i_K \geq i_{m+1}$;

2. $i_K = 0,\ K < K_0,\ 1 \leq K_0 \leq m,$

$$0 < i_{K_0} \leq r_{K_0},\ 0 \leq i_K \leq r_K ,$$

$$K_{i0} < K \leq m,\ i_0 \geq i_{m+1} - \sum_{K=K_0+1}^{m} t_K > 0 ;$$

3. для $\omega(K) > K_0$ из $i_K > 0$ следует $i_{\omega(K)} > t_K$, для $\omega(K) = K_0$ из $i_K > 0$ следует $i_{K_0} > t_K \geq \sum (i_K - i_{m+1})$, для $\omega(K) < K_0$ всегда $i_K = 0$.

Каждый допустимый набор ($i_1, i_2, \ldots, i_{m+1}$) соответствует единственному элементу графа G

$$\Gamma = \Phi(i_1, i_2, \ldots, i_{m+1})$$

такому, что выполняются условия

$$i_K = \left| \widetilde{L}_K \cap \Gamma \right|,$$

$$K > K_0 ;$$

$$\widetilde{L}_{K_0} \cap \Gamma = L(x'_{K_0}, y'_{K_0});$$

$$i_{K_0} = \left| L(x_{K_0}, y'_{K_0}) \right|;$$

$$\sum_{K=K_0}^{m} \left| \widetilde{L}_K \cap \Gamma \right| = i_{m+1} .$$

Обратно, каждому элементу Γ дерева графа G соответствует единственный допустимый набор. Чтобы убедиться в этом, достаточно проверить, что непустые пересечения $\widetilde{L}_p \cap \Gamma$, кроме первого, содержат вершину x_p. Для этого рассмотрим разложение дерева G на два непересекающихся элемента дерева графа $G = M_1 \cup M_2$, где

$$M_1 = \bigcup_{\omega(t)\neq p} \widetilde{L}_S, \text{ при } t = 1, 2, \ldots,$$

$$M_2 = \bigcup_{\omega(t_0)=p} L_S, \text{ для некоторого } t_0.$$

Очевидно, что если $\Gamma \cap \widetilde{L}_p = \varphi$ и $x_p \in \Gamma \cap \widetilde{L}_p$, то $\Gamma \subset M_2$. Следовательно, $\Gamma \cap \widetilde{L}_2 = \Phi(r < p)$, что собственно необходимо было вычислить и доказать.

Множество допустимых наборов и множество элементов графа G необходимо упорядочить с использованием лексикографических правил. Здесь будем считать, что

$$(i_1, i_2, \ldots, i_{m+1}) < (i'_1, i'_2, \ldots, i'_{m+1}),$$

если $i_{m+1} = i'_{m+1}$

или $i_m = i'_m, \ldots, i_{m-l+1} = i'_{m-l+1} \cdot i_{m-l} < i'_{m-l}$ при $0 \leq l \leq m$.

Соответственно

$$\Gamma = \Phi(i_1, i_2, \ldots, i_{m+1}) < \Gamma_i = \Phi(i'_1, i'_2, \ldots, i'_{m+1}) .$$

Пусть $\Gamma = \Phi(i_1, i_2, \ldots, i_{m+1})$ – элемент дерева G. Построим дерево $\Gamma_i = \Phi(j_1, j_2, \ldots, j_{m+1})$, непосредственно следующее за Γ. Для этого следует использовать процедуру минимизации. Пусть $l_0 = \min(S / i_S < r_S)$. Полагаем $j'_S = i'_S(l_0 < S \leq m+1),\ j'_{l_0} = i_{l_0} + 1$. Следует считать, что

$$\sum_{K=l_0}^{m} j'_K < j'_{m+1} . \qquad (3)$$

Пусть $l_1 = \max[\omega(S) / \omega(l) < l_0]$.Полагаем,что $j'_S = 0\ (l_1 < S < l_0)$; $j'_{l_1} = \max(t_1 / \omega(l) = l_1; j'_l > 0)$.

Проверим выполнение неравенства (3) для $l_0 = l'_1$. Если оно выполнено, то процедуру построения повторяем.

В процессе построения с использованием *лексикографических правил* возможны следующие случаи:

Для некоторого $r \geq 0$ $l_r = 1$ и $C = j_{m+1} - \sum j_K \geq 0$ получаем

$$j_S = j'_S + \min\left\{ r_S - j'_S, \left(C - \sum_{K=1}^{S-1} (j_K - j'_K)^K \right) \right\} ,$$

при $1 \leq S \leq m$.

Для некоторого $r \geq 0$ $C = j'_{m+1} - \sum_{K-l_r}^{m} j'_K < 0$

проверим выполнение условий:

$$\min_{\omega(K)=t_K} t_K \geq C; \quad (4)$$

$$i_K > 0(K > l_r) \rightarrow \omega(K) \geq l_r. \quad (5)$$

Здесь, полагаем, что

$$j_S = 0, 1 \leq Sl_r; j_S = j'_S, l_r \leq S \leq m+1.$$

Если одно из условий (4), (5) не выполнено, то полагаем $l_0 = \min(S / i_S < r_S; S > l_0)$, тогда проводим построение набора $(j_1, j_2, \ldots, j_{m+1})$ сначала.

Если в процессе построения получится $l_0 = m+1$, то принимаем версию:

$$j'_{m+1} = i_{m+1} \text{ или } j_S = \min\left\{ j_{m+1} - \sum_{K=1}^{S-1} j_K \right\},$$

где $1 \leq S \leq m$.

Построенный допустимый набор $(j_1, j_2, \ldots, j_{m+1})$ непосредственно следует за набором $(i_1, i_2, \ldots, i_{m+1})$, а дерево $\Gamma = \Phi(j_1, j_2, \ldots, j_{m+1})$ непосредственно следует за деревом $\Gamma = \Phi(i_1, i_2, \ldots, i_{m+1})$.

Совершенно очевидно, что полученный *линейный порядок* элементов дерева *G* согласован с их частичным порядком по включению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Samouylov K., Gudkova I., Markova E.* Formalizing set of multiservice models for analyzing preemption mechanisms in wireless 3gpp networks // Communications in Computer and Information Science. 2016. Т. 601. С. 61-71.
2. *Lyashko F.E.* On some methods of formalization of approaches to technological operations design // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 3. С. 136-139.
3. *Ляшко Ф. Е., Рудень В.А.* Аналитическое описание технологического комплекса // Актуальные проблемы развития социально-экономических систем. Сборник научных трудов. 2016. С. 375-380.
4. *Белый, М. И., Ляшко Ф.Е., Соколова О.Ф.* Риск в сфере воздушных перевозок // Инновационно – инвестиционные проекты и методики их реализации в сфере рыночной экономики: сб. мат. Всерос. науч. – практ. конф. Пенза, 1998. С. 90-92.
5. *Боков В.А., Ляшко Ф.Е., Черняк Б.Я.* Устройство для измерения амплитуды смещения рабочего торца волновода при ультразвуковой сварке пластмасс // Сборочное производство. 1979. № 9. С. 36-38.
6. *Ляшко Ф.Е., Соколова О.Ф., Денисова Т.В.* Организация производства промышленного предприятия с позиции методологии фукционально-стоимостной инженерии // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 2. С. 19-23.
7. *Ляшко Ф. Е., Халмурзаев Х., Черняк Б.Я.* Система регистрации амплитуды колебаний при испытаниях металлов на ультразвуковых частотах // Прочность металлических элементов конструкции при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения : сб. науч. трудов. Киев: Наукова думка, 1980. С. 883-885.
8. *Ляшко Ф.Е. Попов П.М., Рыжаков С.Г.* Графоаналитические методы и процедуры моделирования параметров технологических процессов производства гнутолистовых профилей по технологическим переходам // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(2). С. 431-439.
9. *Ляшко Ф.Е., Тлустенко С.Ф.* Косвенные методы топологического описания технологических комплексов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 4. С. 104-109.
10. *Ляшко Ф.Е.* Методика проведения расчётов экономической эффективности работы сборочного производства самолётов на основе математического моделирования процессов в САПР, АСУТП, АСТПП комплексной АСУП // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 2. С. 34-39.
11. *Ляшко Ф.Е., Манеева Ю.Р.* Модельные представления обрабатывающих технологических операций // Актуальные проблемы развития социально-экономических систем. Сборник научных трудов. 2016. С. 370-375.
12. *Ляшко Ф.Е., Попов П.М.* Организация производства сборки фюзеляжа самолёта на основе алгоритмизации проектно-технических процедур и технологических процессов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 2. С. 95-106.
13. *Ляшко Ф.Е.* Теория, исследования, технология производства систем аэрокосмического машиностроения из синтетических материалов. Москва: Наука и технологии, 2007. – 536 с.
14. Экономико-социальное развитие России и его статистическое международное макроизмерение / *Е.А. Машихин, А.Ш. Костин, Ф.Е. Ляшко* [под ред. В. А. Барвинка]. Самара: Самарский научный центра РАН, 2008. – 322 с. ISBN 987-5-93424-377-8.
15. Методика проведения расчётов экономической эффективности работы сборочного производства самолётов на основе математического моделирования процессов в САПР, АСУТП, АСТПП комплексной АСУП. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 2. С. 34-39.
16. *Соколова О. Ф.* Разработка методов и средств информатизации организации производственных процессов сборки самолетов: Дисс. канд. техн. наук: 05.13.12; защищена 28.06.05. Ульяновск, 2005. 151 с.
17. *Тиц С.Н., Коптев А.Н., Ляшко Ф.Е.* Состояние и проблемы практического применения методов неразрушающего контроля планеров воздушных судов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2007. Спец. вып. Т. 2. С. 164-168.
18. *Чоракаев О.Э., Соснин П.И.* Использование вопросно-ответного подхода при проектировании шаблонов деталей на авиационном предприятии // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования. Сборник научных трудов VI Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых ИМАП-2014. Под редакцией А.Н. Афанасьева. 2014. С. 205-210.
19. *Чоракаев О.Э.* Модель математической оценки эффективности мероприятий над эргатической системой на примере процесса разработки элементов технологического оснащения авиационных изделий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4(4). С. 876-879.
20. *Щеклеин В.С., Чоракаев О.Э.* Подход к математи-

ческому моделированию производства на авиастроительном предприятии на основе развития метода сетевого планирования управления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4(3). С. 874-877.

21. *Чоракаев О.Э., Соснин П.И.* Подход к формальному описанию структуры шаблонов авиационных деталей // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования Сборник научных трудов VI Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых ИМАП-2014. Под редакцией А.Н. Афанасьева. 2014. С. 211-215.

RESEARCH OF AIRCRAFT ASSEMBLY PROCESSES BY FUNCTION

© 2017 O.F. Sokolova, M.I. Sokolova, I,N. Kulikov

Institute of Aviation Technology and Management of Ulyanovsk State Technical University

This article focuses on the possibility of optimization of the assembly processes of structural complex products by time parameter through the due to the performance of assembly operations as time measured functions and their execution sequence as sequence of contraction of arcs of the graph of conjugations.
Keywords: aircraft assembly processes, time measured functions, sequence of contraction of arcs of the graph of conjugations.

Olga Sokolova, Candidate of Technics, Associate Professor.
E-mail: sokof1407@rambler.ru
Margarita Sokolova, Bachelor's Degree Student.
E-mail: sokof1407@rambler.ru
Ivan Kulikov, Master's Degree Student.
E-mail: vanokul95@mail.ru