

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА СБОРКИ АГРЕГАТОВ ЛЕГКОГО САМОЛЕТА

© 2015 Г.М. Гришанов, С.А. Колычев

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

Поступила в редакцию 30.07.2015

В работе рассматриваются модели и методы расчета параметров и анализа чувствительности ориентированного графа сборки агрегатов легкомоторного самолета к изменению длительности работ. На этой основе решена задача формирования матриц чувствительности, позволяющих оперативно определить изменения параметров графа к возмущающим воздействиям.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, длительность производственного цикла, ориентированный граф, матрица чувствительности.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Авиационная и космическая промышленность все шире применяет в качестве конструкционных материалов в ответственных узлах и агрегатах композиционные материалы на основе стеклянных, углеродных и органических волокон.

Композиционные материалы по своим характеристикам по многим параметрам превосходят традиционные авиационные сплавы. В настоящее время наибольшее применение в конструкциях легкомоторных самолетов получили стеклопластики, в которых в качестве армирующих элементов используются стеклянные волокна в форме ткани, ровинга, шпона, а в качестве матрицы, как правило, используются отвержденные эпоксидные, а иногда полиэфирные смолы.

В некоторых несущих элементах конструкции применяются углепластики, отличающиеся высокой удельной прочностью, термостойкостью, термостабильностью свойств и геометрических размеров, высокой усталостной прочностью. Сравнительные характеристики конструкционных материалов, используемых в производстве легких самолетов приведены в табл. 1.

Применение стеклопластиков, как следует из табл. 1, позволяет увеличить эксплуатационный ресурс в 1,5..2 раза, снизить массу конструкции на 20-25% и трудоемкость производства изделий [1].

### 2. МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА

Рассмотрим основные характеристики и параметры ориентированного графа и приведем модели их расчета.

*Гришанов Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры экономики.*

*Колычев Сергей Александрович, аспирант кафедры организации производства. E-mail: kolychev\_sa@mail.ru*

Параметры работ:

Ранний срок начала работы:

$$X_n(ij) = t[L(J \div i) \max] = X(i)$$

- суммарная продолжительность работ, лежащих на максимальном пути, ведущим к данной работе от i-го исходного события.

2. Ранний срок окончания работы является наиболее ранним (минимальным) из возможных моментов окончания работы при заданной продолжительности.

Ранний срок окончания работы:

$$X_0(ij) = X_n(ij) + t(ij) = X(i) + t(ij)$$

- сумма раннего срока начала работы и продолжительности  $t(ij)$  этой работы.

3. Поздний срок окончания работы:

$$Y_0(ij) = T_{kp} - t[L(j \div C) \max] = Y(j)$$

- это разность между продолжительностью критического пути  $T_{kp}$  и суммарной продолжительностью работ, лежащих на максимальном пути  $t[L(j \div C) \max]$ , ведущим от j-го конечного события работы к завершающему событию проекта.

4. Поздний срок начала работы является наиболее поздним (максимальным) из допустимых моментов начала данной работы, при котором еще возможно выполнение всех последующих работ в установленный срок.

Поздний срок начала работы  $Y_n(ij)$  :

$$Y_n(ij) = Y_0(ij) - t(ij)$$

- разность позднего срока окончания работы  $Y_0(ij)$  и продолжительности этой работы.

5. Полный резерв времени работы:

$$R(ij) = Y(j) - X(i) - t(ij)$$

- это величина резерва времени максимального из путей, проходящих через данную работу.

Полный резерв времени работы характеризует максимальное количество времени, на которое можно опоздать с начала работы (ij) по сравнению

**Таблица 1.** Характеристики конструкционных материалов

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности МПа	Удельная прочность
Сталь 30ХГСА	7,85	800	101,9
Д16Г	2,85	440	154,4
Титан ОТ-4	4,5	800	177,8
Стеклотекстолит	1,7	500	294,1
Однонаправленный стеклопластик	2	1000	500
Однонаправленный углепластик	1,5	1020	680

с наиболее ранним временем ее начала  $X(i)$ , не увеличивая при этом времени выполнения всего проекта.

6. Частный резерв первого вида:

$$R_1(ij) = Y(j) - Y(i) - t(ij)$$

- это часть полного резерва времени работы, которая может быть использована для увеличения ее продолжительности при условии, что это не вызовет изменения позднего срока свершения начального события. У работ, выходящих из событий, лежащих на критическом пути, частный резерв первого вида совпадает с полным резервом.

7. Частный резерв второго вида:

$$R_2(ij) = X(j) - X(i) - t(ij)$$

- это часть полного резерва времени работы, которая может быть использована для увеличения ее продолжительности при условии, что это не вызовет изменения раннего срока свершения конечного события. Для работ, заканчивающихся в событиях, лежащих на критическом пути, частный резерв второго вида совпадает с полным резервом.

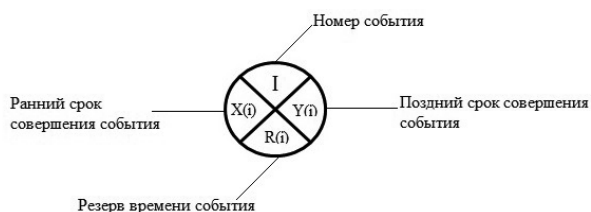
8. Свободный резерв времени работы:

$$R_c(ij) = X(j) - Y(i) - t(ij)$$

- это часть полного резерва времени работы, на которую можно отсрочить начало или увеличить ее продолжительность при условии, что это не вызовет изменения ранних сроков начала последующих работ.

Все работы, лежащие на критическом пути, не имеют резервов. Срыв сроков свершения событий и выполнения работ критического пути ведет к срыву сроков выполнения всего комплекса работ.

Рассчитанные параметры события записываются в его изображение в виде кружка следующим образом:



Для определения количественной степени влияния изменения продолжительности работ на изменение всех выходных параметров графа использованы коэффициенты чувствительности.

Коэффициенты чувствительности, например, ранних и поздних сроков свершения событий к изменению продолжительности работ  $t(lk)$ , определены в соответствии с уравнениями:

$$\alpha_j^{(lk)} = \frac{\partial X(j)}{\partial t(lk)} = \frac{\partial \left\{ \max_{(ij) \in U_j^+} [x(i) + t(ij)] \right\}}{\partial t(lk)}, \forall j = \overline{2, n} \quad (1)$$

$$\beta_i^{(lk)} = \frac{\partial Y(i)}{\partial t(lk)} = \frac{\partial \left\{ \min_{(ij) \in U_i^-} [y(j) + t(ij)] \right\}}{\partial t(lk)}, \forall i = \overline{2, n-1} \quad (2)$$

Полученные уравнения позволяют сформировать матрицу чувствительности ранних  $\alpha$  и поздних  $\beta$  сроков свершения события.

Чувствительность ранних сроков свершения всех событий можно представить следующей матрицей чувствительности  $\alpha$ , каждая строка которой есть вектор коэффициентов чувствительности раннего срока свершения всех событий к изменению продолжительности какой-то одной работы, а каждый столбец есть вектор коэффициентов чувствительности раннего срока свершения какого-то одного события к изменению продолжительности всех работ:

$$\alpha = \begin{pmatrix} X(1) & X(2) & \dots & X(n) \\ \alpha_2^{(1,2)} & \alpha_3^{(1,2)} & \dots & \alpha_n^{(1,2)} \\ \alpha_2^{(1,3)} & \alpha_3^{(1,3)} & \dots & \alpha_n^{(1,3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_2^{(n-1,n)} & \alpha_3^{(n-1,n)} & \dots & \alpha_n^{(n-1,n)} \end{pmatrix} \begin{matrix} t(1,2) \\ t(1,3) \\ \dots \\ t(n-1,n) \end{matrix}$$

Аналогичным образом можно построить матрицу чувствительности поздних сроков свершения событий  $\beta$ .

При известных матрицах чувствительности изменения всех ранних и поздних сроков свершения событий  $\Delta X(j)$ ,  $\Delta Y(i)$  при одновременном изменении продолжительности работ на величины  $\Delta t(lk)$  будут определяться следующим образом:

$$\Delta X(j) = \sum_{(lk) \in M} \alpha_j^{(lk)} \cdot \Delta t(lk) \quad (3)$$

$$\Delta Y(i) = \sum_{(lk) \in M} \beta_i^{(lk)} \cdot \Delta t(lk) \quad (4)$$

Таким образом, сформированные матрицы чувствительности дают возможность без пересчетов параметров ориентированного графа оперативно определить все изменения его выходных параметров к возмущающим воздействиям [2, 3].

### 3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА СБОРКИ НЕРВЮРЫ КРЫЛА ЛЕГКОМОТОРНОГО САМОЛЕТА «ЯСТРЕБ»

Рассмотрим пример технологии сборки элемента конструкции крыла из полимерных композиционных материалов методом холодного формования.

На схеме ОЧК выделена сборка рядовой нервюры крыла, для которой построен ориентированный граф (рис. 2), позволяющий определить длительность производственного цикла, провести анализ влияния работ на весь цикл сборки, проанализировать влияние изменения промежуточных работ на конечный результат.

В табл. 2, 3 представлены события и параметры ориентированного графа сборки рядовой нервюры.

В табл. 2 к событиям (i) ориентированного графа отнесены:

- 1 – подготовка материалов
- 2 – подготовка связующего полимера
- 3 – раскрой стеклоткани
- 4 – подготовка армирующего элемента
- 5 – обработка и укладка армирующего элемента
- 6 – укладка крайнего слоя нервюры
- 7 – матричная укладка/вакуумирование

В таблице 3 к работам (ij) ориентированного графа отнесены:

- 1-2 подготовка связующего
- 1-3 подготовка стеклоткани
- 1-4 подготовка армирующего (пенопласта)
- 2-3 пропитка стеклоткани
- 2-6 пропитка второго слоя стеклоткани
- 3-5 укладка первого слоя
- 3-6 укладка в матрице стеклоткани
- 4-5 укладка пенопласта
- 5-6 укладка в матрице пенопласта
- 6-7 вакуумирование

Чувствительности ранних и поздних сроков свершения событий ориентированного графа, сформированные в соответствии с уравнениями (1, 2), представлены в виде следующих матриц  $\alpha$ ,  $\beta$ :

матрица чувствительности ранних сроков свершения событий

$$\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} t(1,2) \\ t(1,3) \\ t(1,4) \\ t(2,3) \\ t(2,6) \\ t(3,5) \\ t(3,6) \\ t(4,5) \\ t(5,6) \\ t(6,7) \end{matrix}$$

матрица чувствительности поздних сроков свершения событий

$$\beta = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} t(1,2) \\ t(1,3) \\ t(1,4) \\ t(2,3) \\ t(2,6) \\ t(3,5) \\ t(3,6) \\ t(4,5) \\ t(5,6) \\ t(6,7) \end{matrix}$$

Сформированная таблица параметров и матрицы чувствительности ранних и поздних сроков ориентированного графа позволяет научно, оперативно обосновать принимаемые управленческие решения относительно всех промежуточных и конечных сроков выполнения заказа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бгатов В.И., Кропивенцев Д. А., Шахмистов В.М., Технология изготовления агрегатов легких самолетов из полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. 2006. Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. С. 14–17.
2. Задачи управления в социальных и экономических системах / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, И.А. Горгидзе, Г.С. Джавахадзе, Р.А. Хуродзе, А.В. Щепкин // Управление организационными системами. 1992. № 10. С. 42–79.
3. Голубева Т.В. Модели и методы повышения эффективности производства на основе оптимизации длительности производственного цикла с использованием аппарата теории чувствительности: дисс. ... канд. экон. наук. 08.00.13 / Голубева Татьяна Владимировна. – Самара, 2004. – С. 59–71.
4. Кирилина С.А. Методология и инструментарий бюджетно- инвестиционного управления конкурентным экономическим потенциалом предприятия по производству ракетно-космической техники: Автореф. дисс. ... докт. экон. наук. 08.00.05 / Кирилина Светлана Александровна. – Самара, 2010. – 40 с.

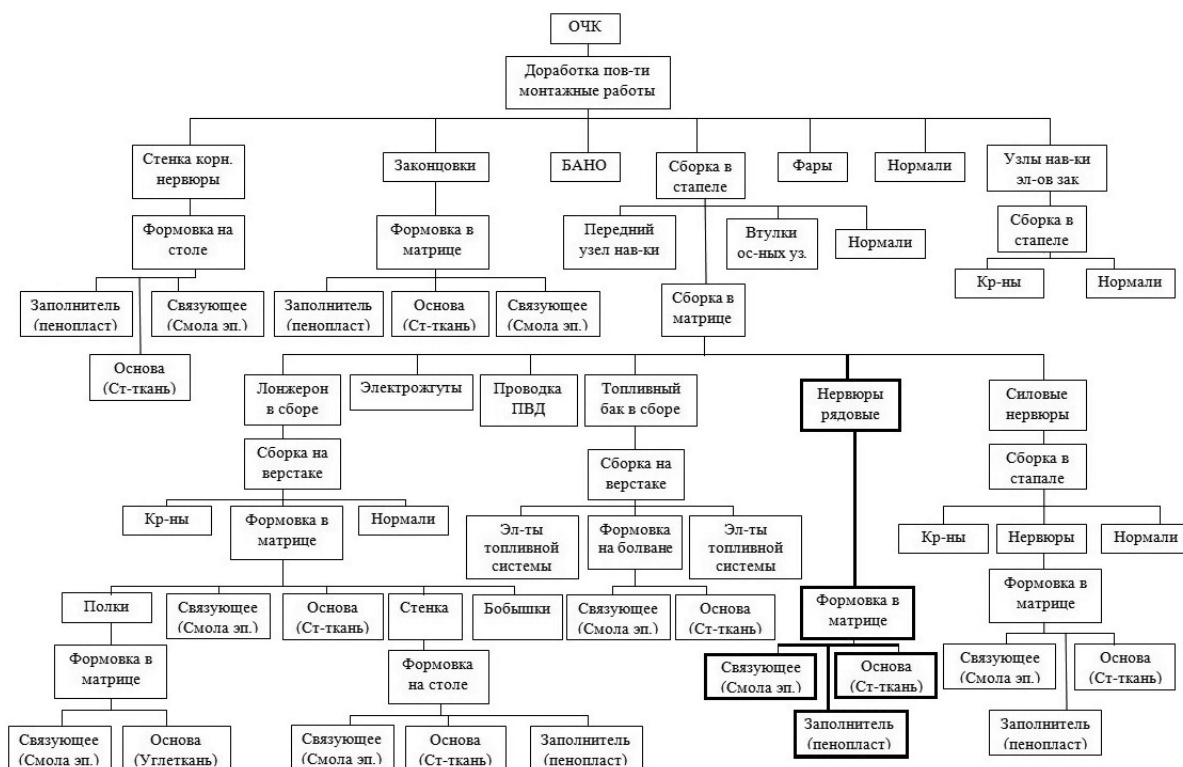


Рис. 1. Схема сборки отъемной части крыла (ОЧК) легкомоторного самолета

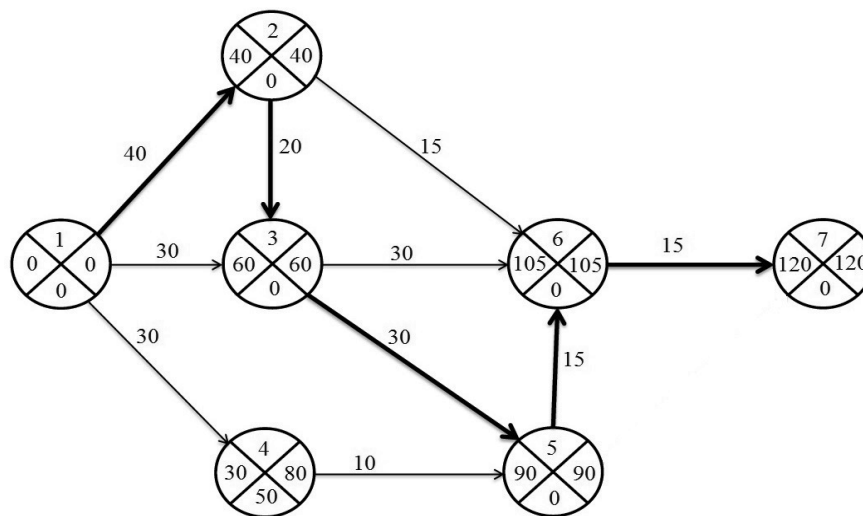


Рис. 2. Ориентированный граф сборки рядовой нервюры

Таблица 2. События ориентированного графа сборки рядовой нервюры

Событие (i)	X(i)	Y(i)	R(i)
1	0'	0	0'
2	40'	40'	0'
3	60'	60'	0'
4	30'	80'	50'
5	90'	90'	0'
6	105'	105'	0'
7	120'	120'	0'

**Таблица 3.** Расчет параметров ориентированного графа

Работа (i-j)	t (ij)	X <sup>n</sup> (ij)	X <sup>o</sup> (ij)	Y <sup>o</sup> (ij)	Y <sup>n</sup> (ij)	R (ij)	R <sup>1</sup> (ij)	R <sup>2</sup> (ij)	R <sub>c</sub> (ij)
1-2	40'	0'	40'	40'	0'	0'	0'	0'	0'
1-3	30'	0'	60'	60'	30'	30'	30'	30'	30'
1-4	30'	0'	30'	80'	50'	50'	50'	0'	0'
2-3	20'	40'	60'	60'	40'	0'	0	0'	0'
2-6	15'	40'	55'	105'	90'	50'	50'	50'	50'
3-5	30'	60'	90'	90'	60'	0'	0'	0'	0'
3-6	30'	60'	90'	105'	75'	15'	15'	15'	15'
4-5	10'	30'	40'	90'	80'	50'	0'	50'	0'
5-6	15'	90'	105'	105'	75'	0'	0'	0'	0'
6-7	15'	105'	120'	120'	105'	0'	0'	0'	0'

**MODELS AND METHODS OF CALCULATION PARAMETERS AND ANALYSIS SENSITIVITY OF ORIENTED GRAPH OF ASSEMBLING UNITS OF LIGHT AIRCRAFT**

© 2015 G.M. Grishanov, S.A. Kolychev

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

The paper deals with models and methods of calculation parameters and analysis sensitivity of oriented graph of assembly units of light aircraft to change the duration of the works. On this basis, it solved the problem of the formation of the matrix sensitivity, allowing to quickly identify changes in the parameters of the graph to the disturbing influences.

*Key words:* polymeric composites, the duration of the production cycle, oriented graph, the sensitivity matrix.