

## **Выполнение в директивный срок комплекса работ по автоматизированной конвейерной сборке самолета с пересмотром топологии сетевого графика**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»  
Сумской государственный университет*

Сформулирована проблема необходимости планирования комплекса работ по автоматизированной конвейерной сборке самолета для поиска оптимальной формы организации технологического процесса. С целью решения этой задачи рассмотрен вариант оптимизации хода работ с пересмотром топологии сетевого графика. Приведен пример расчета вероятности выполнения комплекса работ в директивный срок. Представлены результаты, подтверждающие преимущество оптимизации сетевого графика с пересмотром топологии при автоматизированной конвейерной сборке самолета.

**Ключевые слова:** сетевой график, сборка самолета, оптимизация, вероятность, графики загрузки, директивный срок

### **Введение**

Для отечественного производителя авиационной техники характерна частая смена объекта производства, вызванная разнообразием требований заказчиков, что в свою очередь приводит к единичному или мелкосерийному характеру производства.

Проектирование современных самолетов семейства «Ан» (Ан-70, Ан-140, Ан-148, Ан-158 и др.) осуществляется с использованием систем автоматизированного проектирования (computer-aided design, CAD), часто называемых интегрированными комплексами CAD/CAM/CAE/PLM, которые позволяют автоматизировать не только процессы проектирования, но и задачи технологической подготовки производства (ТПП). При этом детали изготавливают и контролируют с помощью оборудования с ЧПУ (станки с ЧПУ, монтажные станды с ЧПУ, лазерные трекары и т.д.). Вместе с тем, монтаж и наладка сборочной оснастки в основном происходят, как правило, вручную [1 – 5].

Установленные на основании схем конструктивно-технологического членения технические и логические взаимосвязи между проводимыми работами позволяют перейти к построению сетевого графика.

Выбор оптимальной формы организации технологического процесса (ТП) начинают с нахождения критического пути и резервов времени сетевого графика. После чего проводят всесторонний анализ графика и предпринимают меры по его оптимизации. При этом под оптимизацией сетевого графика понимается процесс улучшения организации комплекса работ с учетом сроков выполнения используемых ресурсов.

Анализ сетевого графика и дальнейшая его оптимизация проводят с целью:

1. Сокращения продолжительности критического пути, т.е. срока выполнения всего комплекса работ;

2. Выравнивания коэффициентов напряженности работ;
3. Выравнивания загрузки исполнителей по календарным периодам, сокращения перегрузок и перерывов в работе.

При оптимизации хода работ используются различные организационные решения. В связи с этим возникает вопрос о поиске оптимальной формы организации ТП, что не возможно без рассмотрения всех возможных организационных решений и сравнения их по критериям эффективности.

### Анализ и оптимизация сетевого графика с пересмотром топологии

Планирование выполнения комплекса работ по ТПП автоматизированной конвейерной сборки самолета на специализированном участке без пересмотра топологии сетевого графика представлено в работе [6]. При оптимизации хода работ применяют различные организационные решения.

Рассмотрим вариант оптимизации хода работ с пересмотром топологии сетевого графика.

В табл. 1 [6] приведен перечень работ с указанием минимального ( $t_{min}$ ) и максимально ( $t_{max}$ ) времени выполнения каждой работы при указанном количестве исполнителей ( $n$ ). После взаимной увязки процесса выполнения комплекса работ каждому событию присваивают номер. При этом каждая работа получает условное обозначение, состоящее из номера начального ( $i$ ) и номера конечного ( $j$ ) события; при этом должно выполняться условие  $i < j$  (табл. 2) [6].

В рассматриваемом случае оптимизации возможно изменение технологии и организации выполнения работ, изменение состава работ и их взаимосвязей. Например, последовательную схему выполнения работ заменяют параллельной; часть работ дополнительно расчленяют или объединяют; передают часть работ критического пути на другие пути и т.д.

Исходный сетевой график, линейная карта сети и график загрузки исполнителей представлены на рис. 1 – 3 в работе [6].

Один из вариантов оптимизации с пересмотром топологии сетевого графика приведен на рис. 1.

Результаты оптимизации представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты оптимизации

Параметры автоматизации	До оптимизации	После оптимизации	Изменение
Продолжительность критического пути, дней	48	34	-29,2%
Среднее количество исполнителей, чел.	6	6	-
Максимальное количество исполнителей, чел.	12	11	-8,3%

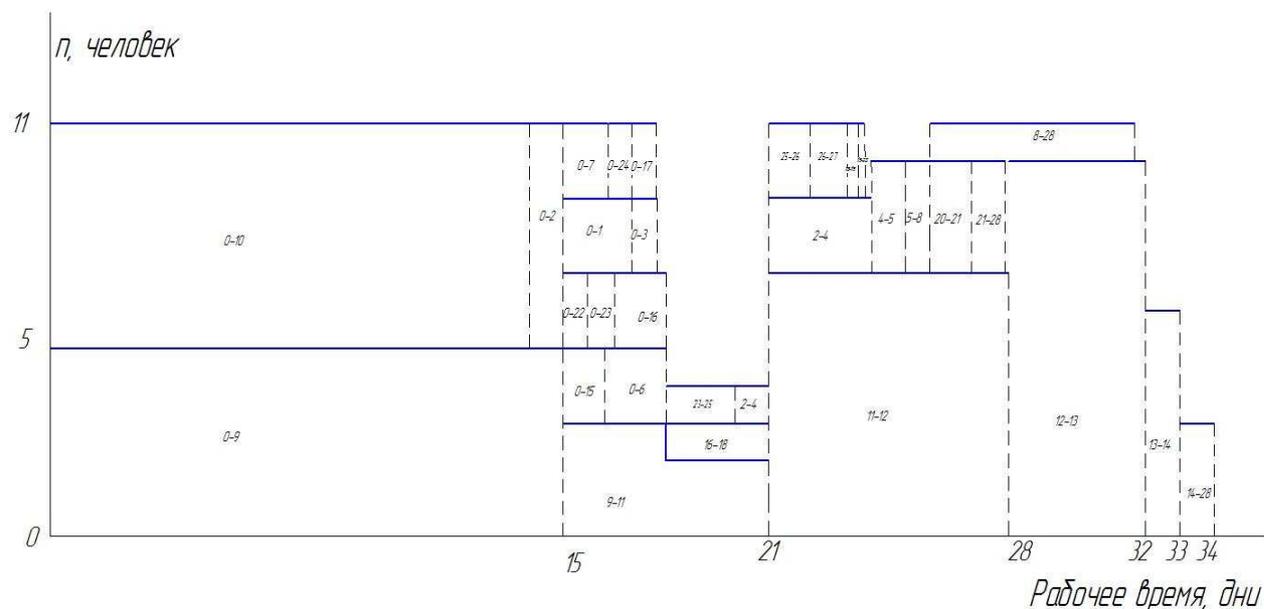


Рис. 1. Оптимизированный график загрузки сборочной оснастки при автоматизированной конвейерной сборке самолета с пересмотром топологии сетевого графика

### Вероятность выполнения комплекса работ в директивный срок

При оценке продолжительности работ целесообразно рассчитывать вероятность выполнения комплекса работ в директивный срок. Для этого достаточно использовать значение дисперсии работ критического пути.

Дисперсии продолжительностей выполнения работ  $\sigma_{ij}^2$  рассчитывают по формуле  $\sigma_{ij}^2 = 0,04(t_{\max} - t_{\min})^2$ .

$$\text{Дисперсия критического пути } \sigma_{\text{кр}}^2 = \sum_{k=1}^n \sigma_{ij \text{ кр}k}^2,$$

где  $\sigma_{ij \text{ кр}}^2$  – дисперсии работ критического пути;

n – количество работ критического пути.

Являясь суммой случайных величин, длительность критического пути  $T_{\text{кр}}$  также представляет собой случайную величину, которая подчиняется закону нормального распределения. Тогда вероятность свершения завершающего события в заданный срок:

$$P(t \leq T^{\text{дир}}) = \int_{-\infty}^{T^{\text{дир}}} f(t) dt,$$

где  $T^{\text{дир}}$  – директивная продолжительность выполнения комплекса работ;

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{кр}} e^{-\frac{(t-T_{дир})^2}{2\sigma_{кр}^2}} \quad - \text{плотность вероятности для нормального}$$

закона распределения;

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sigma_{ij\ кр\ k}^2} \quad - \text{среднеквадратическое отклонение продолжительности}$$

критического пути.

$$\begin{aligned} \text{Тогда } P(t \leq T_{дир}) &= \int_{-\infty}^{T_{дир}} f(t) dt = \int_{-\infty}^{T_{кр}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{кр}} e^{-\frac{(t-T_{кр})^2}{2\sigma_{кр}^2}} dt + \\ &+ \int_{T_{кр}}^{T_{дир}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{кр}} e^{-\frac{(t-T_{кр})^2}{2\sigma_{кр}^2}} dt = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{T_{дир}-T_{кр}}{\sigma_{кр}}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \\ &= 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 + F(x), \end{aligned}$$

$$\text{где } \int_{-\infty}^{T_{кр}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{кр}} e^{-\frac{(t-T_{кр})^2}{2\sigma_{кр}^2}} dt = 0,5; \quad z = \frac{t-T_{кр}}{\sigma_{кр}},$$

$$\text{тогда } dt = \sigma_{кр} dz, \quad x = \frac{T_{дир} - T_{кр}}{\sigma_{кр}},$$

$F(x)$  – интеграл вероятности нормального закона распределения.

Затабулированы следующие интегралы вероятности:

- 1) функция нормального закона распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad \text{где } x = \frac{T_{дир} - T_{кр}}{\sigma_{кр}};$$

- 2) функция Лапласа  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$

- 3) функция ошибки  $\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-z^2} dz, \quad \text{где } y = \frac{T_{дир} - T_{кр}}{\sqrt{2}\sigma_{кр}},$

которые являются нечетными функциями, т.е.

$$F(-x)=-F(x);$$

$$\Phi(-x)=-\Phi(x);$$

$$\operatorname{erf}(-y)=-\operatorname{erf}(y).$$

Тогда вероятность свершения завершающего события в заданный срок можно рассчитать как

$$P(t \leq T^{\text{дир}}) = 0,5 + F(x) = 0,5 + \frac{\Phi(x)}{2} = 0,5 + \frac{\operatorname{erf}(y)}{2},$$

где  $x = \frac{T^{\text{дир}} - T_{\text{кр}}}{\sigma_{\text{кр}}}$ ;  $y = \frac{T^{\text{дир}} - T_{\text{кр}}}{\sqrt{2}\sigma_{\text{кр}}}$ .

Для нахождения доверительного интервала, в котором интеграл вероятности практически равен 1, существует «правило трех сигм», согласно которому это интервал  $[T_{\text{кр}} - 3\sigma; T_{\text{кр}} + 3\sigma]$ .

Чтобы определить возможный срок выполнения работ с заданной вероятностью  $P(t \leq T^{\text{дир}})$ , необходимо:

- 1) определить значение интеграла вероятности, для заданного значения

$$P(t \leq T^{\text{дир}}):$$

$$P(t \leq T^{\text{дир}}) = 0,5 + F(x); \quad F(x) = P(t \leq T^{\text{дир}}) - 0,5;$$

- 2) для найденного  $F(x)$  определить  $x$ ;

- 3) зная  $x$ , определить  $T_{\text{дир}}$  из формулы  $x = \frac{T^{\text{дир}} - T_{\text{кр}}}{\sigma_{\text{кр}}}$ ;

$$T^{\text{дир}} - T_{\text{кр}} = x\sigma_{\text{кр}}; \quad T^{\text{дир}} = x\sigma_{\text{кр}} + T_{\text{кр}}.$$

Исходные данные для расчета представлены в табл.2.

Табл. 2. Данные для расчета вероятности выполнения работ в директивный срок

	Перечень работ	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$\sigma_{ij}^2$
0-1	Сборка элементов поперечного силового набора консоли крыла	1	3,5	0,25
0-2	Сборка элементов продольного силового набора консоли крыла	2	4,5	0,25
0-3	Сборка элементов усиления консоли крыла	1,1	2,1	0,04
2-4	Сверление, зенкерование, клепка панели консоли крыла	5	10	1
4-5	Сборка панелей	0,6	1,6	0,04
5-8	Сборка секций	0,5	1	0,01
8-28	Сборка крыла	1	3,5	0,25
0-6	Сборка хвостовой секции консоли крыла	1,2	2,7	0,09

Табл. 2. (Продолжение)

0-7	Сборка носовой секции консоли крыла	1,2	1,45	0,0025
0-9	Сборка элементов поперечного набора фюзеляжа	11	21	4
0-10	Сборка элементов продольного набора фюзеляжа	10	15	1
9-11	Сверление, зенкерование, клепка панели фюзеляжа	11	21	4
11-12	Установка силовых шпангоутов, сборка панелей	5	10	1
12-13	Сборка секций	6	11	1
13-14	Установка двигателя	1	3,5	0,25
14-28	Установка шасси	0,6	1,6	0,04
0-15	Сборка элементов поперечного силового набора горизонтального оперения	1	1,5	0,01
0-16	Сборка элементов продольного силового набора горизонтального оперения	0,5	3	0,25
0-17	Сборка элементов усиления горизонтального оперения	0,5	1	0,01
16-18	Сверление, зенкерование, клепка панели горизонтального оперения	2	4,5	0,25
18-19	Сборка панелей горизонтального оперения	0,1	0,6	0,01
19-20	Сборка секций горизонтального оперения	0,1	0,35	0,0025
20-21	Сборка горизонтального оперения	1	1,5	0,01
0-22	Сборка элементов поперечного силового набора вертикального оперения	0,5	1	0,01
0-23	Сборка элементов продольного силового набора вертикального оперения	0,4	1,4	0,04
0-24	Сборка элементов усиления вертикального оперения	0,5	1	0,01
23-25	Сверление, зенкерование, клепка панели вертикального оперения	1	3,5	0,25
25-26	Сборка панелей вертикального оперения	1	1,5	0,01
26-27	Сборка секций вертикального оперения	0,6	1,6	0,04
27-21	Установка киля	0,1	0,6	0,01
21-28	Установка хвостовой части фюзеляжа	0,6	1,6	0,04

В данной работе нам необходимо определить:

1) Вероятность  $P(t \leq T^{\text{дир}})$  выполнения комплекса работ в установленный срок  $T^{\text{дир}} = 40$  .;

$$P(t \leq T^{\text{дир}}) = 0,5 + F((40 - 34)/3,76) = 0,5 + 0,445 = 0,945; x = 1,6;$$

2) Для нахождения доверительного интервала, в котором интеграл вероятности свершения завершающего события в директивный срок практически

равен единице, определим по правилу трех сигм:  $[3\sigma - 3\sigma, 3\sigma; 3\sigma + 3\sigma, 3\sigma]$ . Получаем [23; 45].

Таким образом, вероятность свершения завершающего события в директивный срок будет равна 1, при  $T_{дир}=45$ .

### Выводы

1. С целью поиска оптимальной формы организации ТП предложен вариант оптимизации хода работ при автоматизированной конвейерной сборке самолета с пересмотром топологии.

2. На конкретном примере показано, что изменение технологии и организации выполнения работ, состава работ и их взаимосвязей позволяет уменьшить продолжительность критического пути на 29,2%, а максимальное количество исполнителей сократить на 8,3% по сравнению с оптимизацией в условиях отказа от пересмотра топологии сетевого графика.

3. Приведен пример расчета вероятности выполнения комплекса работ в директивный срок.

### Список литературы

1. Воронько, В.В. Основные направления и тенденции развития зарубежных технологий сборки авиационных конструкций [Текст] / В.В. Воронько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 45. – Х., 2010. – С. 87 – 98.

2. Метод автоматизированной конвейерной сборки планера самолета [Текст] / В.С. Кривцов, Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько, В.Е. Зайцев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. трудов. – Вып. 55. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2012. – С. 5 – 13.

3. Робототехнические системы в сборочном производстве [Текст] / под. ред. Е.В. Пашкова – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 272 с.

4. Технология сборки самолетов [Текст] / Ершов В.И., Павлов В.В., Каширин М.Ф., Хухорев В.С. – М.: Машиностроение, 1986. – 456 с.

5. Бабушкин, А.И. Моделирование и оптимизация сборки летательных аппаратов [Текст] / А.И. Бабушкин. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

6. Воронько, В.В. Алгоритм выполнения работ по автоматизированной конвейерной сборке самолета без пересмотра топологии сетевого графика [Текст] / В.В. Воронько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 56. – Х., 2012. – С. 78 – 88.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков  
Поступила в редакцию 28.01.1203.

## **Виконання в директивний термін комплексу робіт по автоматизації конвеєрного складання літака з переглядом топології мережевого графіка**

Сформульована проблема необхідності планування комплексу робіт з автоматизованого конвеєрного складання літака для пошуку оптимальної форми організації технологічного процесу. З метою розв'язання цієї задачі розглянуто варіант оптимізації ходу робіт при автоматизованому конвеєрному складанні літака з переглядом топології мережного графіка. Наведено приклад розрахунку ймовірності виконання комплексу робіт в директивний термін при автоматизованому конвеєрному складанні літака. Представлено результати, що підтверджують перевагу оптимізації мережного графіка з переглядом топології при автоматизованому конвеєрному складанні літака.

**Ключові слова:** мережевий графік, складання літака, оптимізація, ймовірність, графіки завантаження, директивний термін.

## **Running in the due date of works on automated conveyor assembly plane with the revision of network topology graph**

Presents the problem of the need to plan a range of works on automated conveyor assembly of the aircraft in order to find the optimal form of organization of the process. In order to find the optimal form of organization of the variant of the process of optimization progress in automated conveyor assembly of the aircraft with the revision of the topology. Is an example of calculating the probability of a range of works in the due date for the automated assembly conveyor plane. The results confirming the advantage of optimizing the network topology graph to the revision in automated conveyor assembly of the aircraft.

**Keywords:** network diagram, build planes, optimization, probability charts download the due date.