

Т. Ф. Шмелева¹, д.т.н., проф., Т.Р Джафарзаде², И. Л. Якунина³

¹ *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

²

³ *Кировоградская летная академия Национального авиационного университета*

Апостериорный анализ авиационного происшествия методами сетевого планирования

Приведен алгоритм построения детерминированной модели – сетевого графика планирования авиационного происшествия. Построена GERT-сеть для авиационного происшествия на примере катастрофы Ту-134 Б в а/н Нахичевань 05.12.65

сетевой график, критическое время, принятие решений, GERT-сеть

Вступление

Гражданская авиация (ГА), которая является отраслью повышенной опасности и ответственности, кроме решения задач обеспечения всевозрастающего спроса на все виды авиационных перевозок, повышения регулярности и экономической эффективности полетов, должна также обеспечивать высокий уровень безопасности полетов. В силу того, что проведение естественных экспериментов в авиации не допустимо, а безопасность полетов необходимо совершенствовать, каждое авиационное происшествие подвергается апостериорному анализу. Проведение апостериорного анализа позволяет разрабатывать рекомендации на будущее, а также дает исходные данные для построения различных математических моделей авиационных происшествий.

Анализ исследований и публикаций

Для изучения авиационных происшествий необходим статистический анализ. Основными источниками статистической информации для анализа авиационных происшествий есть: информационные бюллетени о состоянии безопасности полетов (БП) гражданских воздушных судов (ВС) Украины, сайт Aviation Safety Network [1] (база данных по авиационной безопасности, обновляется раз в неделю, содержит статистические данные по разным типам ВС с 1934 года), сайт EASA European Aviation Safety Agency [2] (распределение авиационных происшествий в странах Европы и мира) и др.

В [3] рассмотрены диаграммы причинно-следственных связей в виде различных графов, деревьев событий и инцидентов, а также функциональных сетей стохастической структуры.

В [4] описывается метод сетевого планирования. Подробно рассмотрен способ построения сетевого графика «кружок - событие, дуга - работа». Приведена формальная запись задания сетевого планирования. На примере показано оптимизацию плана комплекса работ. Некоторые авторы [5] проводили анализ сетевых графиков на примере сложных организационных систем, в основном с теоретической точки зрения.

Причины и следствия отказа авиационного двигателя рассматривались в работах [6] и [7], наиболее распространенные наглядно подано в [8].

Постановка задачи

Поскольку авиационное происшествие это не одномоментное событие, а событие, которое развивается во времени и в пространстве, то целесообразно моделировать авиационные происшествия с помощью сетевых графиков. Использование сетевых графиков в системе поддержки принятия решений авиационного оператора при действиях в особых случаях в полете дает возможность качественно и количественно анализировать внештатные полетные ситуации с целью повышения безопасности полетов.

Сетевой график используется для определения и оптимизации критического времени, которое необходимо для планирования особого случая в полете.

Изложение основного материала

Статистический анализ авиационных происшествий свидетельствует, что отказ авиационного двигателя занимает значительное место среди других причин авиационных происшествий. (7,5%) [1,2]. А отказ силовой установки – авиационного двигателя – на взлете не менее значимая причина, поскольку этап взлета есть одним из наиболее критичных этапов полета – возникновение на этом этапе особого случая дает экипажу значительно меньше шансов для успешного его преодоления.

Известно множество причин отказа двигателя, наиболее распространенными среди них, по мнению экипажей ВС, есть отказ топливной системы двигателя и отказ системы выхлопа [9]. Среди последствий наиболее часто встречаются отклонение от стандартного маршрута вылета, отклонение по курсу, посадка «перед собой». Действия экипажа в случае отказа двигателя на взлете отличаются в зависимости от типа ВС и представлены в руководствах по летной эксплуатации соответствующего самолета.

Сетевой график – это ориентированный граф без контуров. Ориентированные дуги графа интерпретируют статические состояния системы «экипаж – воздушное судно», которые в некоторые моменты времени соответствуют началу или окончанию определенных действий экипажа при переходе системы из одного состояния в другое. Весь процесс парирования особого случая в полете разбиваем на отдельные этапы. Содержание этапов состоит из действий экипажа, которые регламентируются руководством по летной эксплуатации данного типа ВС. Время перехода системы «экипаж - воздушное судно» из одного стационарного состояния в другой можно определить экспериментально в процессе тренажерной подготовки и методом экспертных оценок.

Сетевой анализ авиационного происшествия условно можно разделить на две составляющие:

1. построение сетевого графика выполнения операционных процедур;
2. расчет сетевого графика (определение ранних и поздних сроков выполнения операционной процедуры, определение резервов времени на выполнение той или иной операционной процедуры, определение критического времени, необходимого для парирования данного особого случая, и соответствующего ему критического пути).

Приведем алгоритм построения сетевого графика парирования конкретного авиационного происшествия:

1. определение технологии парирования данного авиационного происшествия согласно нормативных документов, которыми руководствуется авиационный специалист в своей деятельности;
2. разложение технологии парирования на операционные процедуры;
3. присвоение каждой процедуре шифра a_i ;
4. проверка упорядоченности операционных процедур и построение структурной таблицы;
5. определение времени, необходимого для выполнения каждой операционной процедуры a_i ;
6. построение сетевого графика выполнения всего комплекса операционных процедур.

Время, необходимое для выполнения каждой операционной процедуры, можно определить с помощью:

- а) статистических данных;
- б) эксперимента на тренажерах;
- в) экспертного опроса.

На основании полученных данных и построенного сетевого графика можно произвести расчет сетевого графика по следующему алгоритму:

1. Расчет ранних сроков окончания операционной процедуры t_{poj} определяется как сумма раннего срока наступления события T_{pi} и времени выполнения операционной процедуры t_{ij} :

$$t_{poj} = T_{pi} + t_{ij}, T_o=0.$$

2. Расчет ранних сроков начала выполнения операционной процедуры T_{pj} :

$$T_{pj} = \begin{cases} t_{poj} & \text{если к событию подходит одна операционная процедура} \\ \max_{i \in I} t_{poj} & \text{если к событию подходит несколько операционных процедур} \end{cases}$$

3. Расчет поздних сроков выполнения операционных процедур t_{nij} определяется как разница между поздним сроком наступления события T_{nj} и времени выполнения операционной процедуры t_{ij} :

$$t_{nij} = T_{nj} - t_{ij}.$$

4. Расчет поздних сроков появления события T_{nj} :

$$T_{nj} = \begin{cases} t_{nij} & \text{если от события отходит одна операционная процедура} \\ \min_{i \in I} t_{nij} & \text{если от события отходит несколько операционных процедур} \end{cases}$$

5. Расчет резервного времени события R_i определяется как разница между временем наступления события, которое является наиболее поздним T_{ni} , и наиболее ранним T_{pi} сроком окончания события:

$$R_i = T_{ni} - T_{pi}$$

6. Расчет полного резерва операции R_{nij} . Полный резерв операционной процедуры – максимальное время, на которое можно увеличить или уменьшить длительность операционной процедуры $(i-j)$, не изменяя сроков начала события, которое завершается:

$$R_{nij} = T_{nj} - t_{poj} = T_{nj} - T_{pi} - t_{ij}.$$

7. Расчет свободного резерва R_{eij} . Расчет свободного резерва – максимальное время, на которое можно увеличить длительность операционной процедуры $(i-j)$:

$$R_{eij} = T_{pi} - t_{poj} = T_{pj} - T_{pi} - t_{ij}.$$

8. Определение критических L_k и подкритических путей $L_{кр}$.

Критический путь – путь длительность которого равняется критическому времени выполнения операционных процедур человеком – оператором при возникновении авиационного происшествия - L_k .

Критическое время – минимальное время, за которое можно выполнить весь комплекс операционных процедур человеком – оператором при возникновении авиационного происшествия - $T_{кр}$.

Подкритические пути – пути, в которых полный резерв времени не более чем на заданную величину - $L_{кр}$.

Критический путь на сетевом графике – это путь с наименьшим полным резервом. Именно операционные процедуры, которые находятся на критическом пути, очень важны и требуют безотлагательного выполнения. Полный резерв времени пути $R[L_i]$ пути L_i определяется как разность между длиной критического пути $t[L_k]$ и длиной любого полного пути $t[L_i]$ равняется

$$R[L_i] = t[L_k] - t[L_i].$$

Анализировать авиационное происшествие можно также по упрощенному алгоритму построения сетевого графика [13]:

1. Разработать алгоритм – порядок выполнения операционных процедур авиационным специалистом при возникновении авиационного происшествия или при усложнении условий выполнения полета.

2. Разработать блок-схему по алгоритму выполнения операционных процедур авиационным специалистом.

3. Определить время на выполнение операционных процедур с помощью одного из приведенных выше методов.

4. Разработать структурно-временную таблицу перечня операционных процедур авиационного специалиста.

5. Построить сетевой график выполнения операционных процедур авиационным специалистом.

6. Определить критическое время выполнения комплекса авиационных процедур авиационным специалистом и основные этапы принятия решений по парированию возникшей ситуации.

Исследуя влияние принятия решений экипажем, как человеком-оператором, на развитие авиационного события, целесообразно использовать стохастические сети типа GERT, которые позволяют моделировать развитие авиационных событий в сторону усложнения и наоборот. Сети GERT являются альтернативным вероятностным методом сетевого планирования, который используется в случаях такой организации деятельности, когда следующие действия могут начинаться только после завершения некоторого числа предшествующих действий, поэтому GERT допускает наличие циклов и петель [10-12]. При возникновении особого случая, моделирование действий авиационного специалиста усложняется тем, что появляются операционные процедуры с обратной связью (петли), что в свою очередь означает, что конечный узел такой операционной процедуры должен быть выполнен раньше ее начального узла.

Рассмотрим стохастическую сетевую модель GERT развития авиационного события $G=(N;A)$ с множеством узлов N и множеством дуг A . Время t_{ij} на переход от i -ой к j -ой полетной ситуации есть случайная величина. Переход $(i;j)$ может быть выполнен, только если выполняется i -ый узел. Для определения времени t_{ij} на переход от i -ой к j -ой полетной ситуации, необходимо знать условную вероятность (в дискретном случае) или плотность распределения (в непрерывном случае) случайной величины Y_{ij} . Это позволит провести исследование по выполнению всей сети $G=(N;A)$ и определить моменты распределения времени t_{ij} сети G , с помощью которых могут быть вычислены математическое ожидание μ_{jE} и дисперсия времени δ^2 выполнения сети G в случае возникновения усложненной, сложной, аварийной или катастрофической ситуации.

Для определения вероятности наступления конкретного события сети – Q , математического ожидания – $M[T]$ и дисперсии времени до появления события – $D[T]$, необходимо вначале упростить начальную модель, путем объединения последовательных и параллельных контуров в единственную ветвь с эквивалентными исходными параметрами P_{ij} , M_{ij} и их преобразованием W_{ij}^* – коэффициентом пропуска динамической системы.

Общее выражение для передаточной функции сети будет иметь следующий вид:

$$Q = \sum_{i=1}^a \prod_{j=1}^{D_i} P_{ij} \leq 1$$

где a – количество минимальных пропускных соединений внутри графа;

D_i – количество дуг, которые соединяют узлы графа в i -том соединении;

P_{ij} – вероятность передачи сигнала (перехода индикатора) между j -ми дугами графа в i -тых соединениях.

Рассмотрим катастрофу произошедшую с ВС Ту-134 Б 65703 в а/п Нахичевань 05.12.95. Вскорости после взлета у ВС отказывает левый двигатель, при этом экипаж ошибочно отключает исправный двигатель (правый). КВС после принятия решения об аварийной посадке, при попытке отвернуть от жилых районов, вводит самолет в слишком крутой крен с быстрой потерей высоты. Вследствие ряда ошибок экипажа ВС столкнулся с землей, в результате чего полностью разрушился, погибли 52 человека. Причинно-следственные связи, которые привели к данному авиационному происшествию, представлены в табл.1.

Построим GERT сеть для данного авиационного происшествия (рис.1). Для расчета стохастической сети типа GERT введем фиктивную дугу W_A и для каждой j -й дуг определим коэффициенты пропуска $W_j (j=1;25)$:

$$W_j(s) = P_j * M_j(s),$$

где P_j – вероятность выполнения дуги j , при условии, что выполнен узел из которого она выходит;

$M_j(s)$ – вырабатываемая функция (в нашем случае показывает распределение времени принятия j – решения, выполнения j - операции);

L_i – петля;
 $T(L_i)$ – эквивалент пропускания петли L_i .

Таблица 1

Причинно-следственные связи событий, которые содействовали возникновению
авиационного происшествия

1	Полет происходит в нормальных условиях
1-2	Отказал левый двигатель
1-3	Двигатель не отказывал
2-4	Бортмеханик (БМ) определил отказ правого двигателя (ошибочно)
2-5	Экипаж определил отказ левого двигателя
4-6	Самолет пилотировал второй пилот (ВП)
4-7	Самолет пилотировал командир воздушного судна (КВС)
6-8	ВП не сообщает КВС об ошибочном определении отказавшего двигателя БМ
6-9	ВП сообщает КВС об ошибочном определении отказавшего двигателя БМ
8-10	КВС подает команду о штатном отключении правого двигателя, а через 10 с об экстренном отключении правого двигателя.
8-11	КВС дал команду перевести двигатель в режим малого газа, дать ему поработать так две минуты, а затем выключить
10-12	БМ отключает правый двигатель
10-13	БМ осознает ошибку прежде, чем отключает правый двигатель
12-14	БМ докладывает «Отказ полный, второй отказал»
14-15	КВС принимает решение осуществлять вынужденную посадку вне аэродрома
15-16	Впереди по курсу отсутствуют преграды
15-17	Впереди по курсу присутствуют преграды (жилые кварталы)
17-18	КВС отворачивает самолет вправо с креном 36°
18-19	КВС отворачивает самолет вправо с креном максимально 15°
18-20	Самолет потерял высоту и врезался правым крылом во вспаханное поле
20-21	Катастрофа
3-22 9-22 13-22 16-22	Завершение полета без жертв

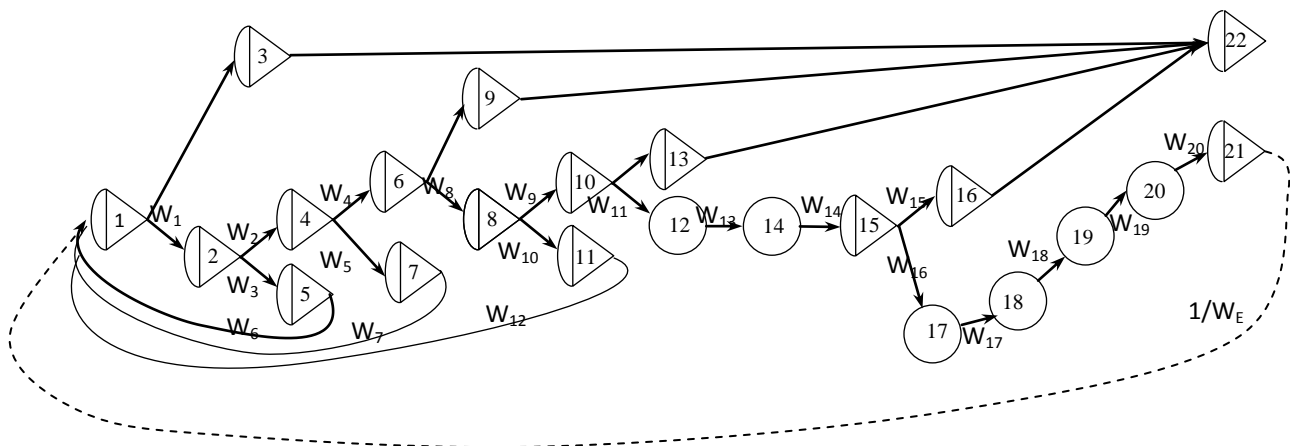


Рис. 1. GERT-сеть катастрофы Ту-134 Б (05.12.95 а/п Нахичевань)

Определим для каждой петли ее эквивалент пропускания:

$$L_1: T_1 = W_1 W_3 W_6$$

$$L_2: T_1 = W_1 W_2 W_5 W_7$$

$$L_3: T_1 = W_1 W_2 W_4 W_8 W_{10} W_{12}$$

$$L_4: T_1 = W_1 W_2 W_4 W_8 W_9 W_{11} W_{13} W_{14} W_{16} W_{17} W_{18} W_{19} W_{20} (1/W_E)$$

Поскольку все петли первого порядка, из топологического уравнения Мейсона имеем:

$$H = 1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 = 0$$

Откуда

$$L_4 = L_1 + L_2 + L_3 - 1$$

Коэффициент пропускания фиктивной дуги:

$$W_E = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_4 \cdot W_8 \cdot W_9 \cdot W_{11} \cdot W_{13} \cdot W_{14} \cdot W_{16} \cdot W_{17} \cdot W_{18} \cdot W_{19} \cdot W_{20}}{T \left(\overset{\sim}{C_1} \right) \cdot T \left(\overset{\sim}{C_2} \right) \cdot T \left(\overset{\sim}{C_3} \right) - 1}$$

Вероятность наступления события 21:

$$P = W_E(0)$$

Функция распределения случайной величины:

$$M_E = \frac{W_E \left(\tilde{C} \right)}{P}$$

Зная функцию распределения времени для каждой j -й дуги сети, можем задать вырабатывающую функцию $M_{Ej}(s)$. Учитывая, что $P_j * M_{Ej}(s) = W_j(s)$ и определив первую и вторую производные вырабатывающей функции сети (с помощью численного дифференцирования), получим моменты первого и второго порядков.

Таким образом, получим такие параметры, как вероятность выполнения узла, математическое ожидание и дисперсию времени выполнения узла. Использование GERT-сетей для моделирования авиационных происшествий позволяет анализировать и прогнозировать развитие особого случая в полете, а также позволяет строить адекватные модели развития полетных ситуаций базы моделей в системе поддержки принятия решений авиационным специалистом.

Выводы

Формализация действий авиационного специалиста как человека – оператора в особых случаях в полете с помощью аппарата сетевого планирования и управления позволяет определить оптимальную последовательность и время выполнения операционных процедур, направленных на парирование особого случая в полете. Использование сетевых графиков при апостериорном анализе позволяет качественно и количественно анализировать авиационное происшествие с целью повышения безопасности полетов. С помощью стохастической сети GERT произведен анализ авиационного происшествия, которое произошло из-за отказа двигателя на взлете 05.12.95 в а/п Нахичевань с ВС Ту-134Б 65703.

Список литературы

1. <http://aviation-safety.net/index.php> - база даних з авіаційної безпеки
2. <http://easa.europa.eu> - сайт EASA /European Aviation Safety Agency / Европейское агентство по безопасности полетов
3. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: учебное пособие для студентов ВУЗов / П.Г. Белов. – М.: Издательский центр "Академия", 2003. – 512 с.
4. Вентцель Е. С. Исследование операций. - М.: «Советское радио», 1972, 552 с.
5. Игнатъева А.В. Исследование систем управления: Учеб. пособие для вузов./ А.В.Игнатъева, М.М.Максимцов - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. - 157 с.
6. Галлай М. Л. Полет самолета с неполной и несимметричной тягой. - М.: Машиностроение, 1970 – 192с.
7. Ильченко М. А. Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов. / М.А.Ильченко, В.В.Крютченко– М.: Машиностроение, 1995 – 320 с.
8. Якунина І.Л. Аналіз особливого випадку в польоті за допомогою мережевого графіка./ І.Л.Якунина, Т.Ф.Шмельова, О.П. Бондар // Вісник НАУ. Науковий журнал. – 2011. - №2 (47). – С. 50-54.
9. Лейченко С. Д. Человеческий фактор в авиации: монография в 2-х кн. Кн. 1. / С.Д.Лейченко, А.В.Малишевский, Н.Ф.Михайлик– Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Государственная летная академия Украины. Санкт-Петербург – Кировоград, 2006. – 480с.
10. Филлипс Д. Методы анализа сетей: Пер. с англ. / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
11. Шмельова Т.Ф. Експертний метод визначення часових характеристик при виникненні особливого випадку в польоті/ Т.Ф.Шмельова, О.П. Бондар, І.Л. Якунина // Системи озброєння і військова техніка: науково-технічний журнал. 2011, № 1(25) С. 175-179.
12. Kharchenko V.P. Methodology for Analysis of Decision Making in Air Navigation System / V.P.Kharchenko, T.F. Shmelova, Y.V. Sikirda // Proceedings of the National Aviation University. – 2011. – №3. – P. 85-94.
13. Якунина І.Л. Мережевий аналіз особливого випадку в польоті / І.Л.Якунина, Т.Ф.Шмельова, О.П.Бондар – Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / Вип.24, Ч. II - Кіровоград: КНТУ, 2011. - С. 214-218.