
УДК 629.7

Сетевая модель процессов подготовки составных частей ракетно-космического комплекса к применению

Т.А. Мусабаев, А.К. Недайвода, Ю.В. Шленов

Аннотация:

В статье рассмотрены особенности разработки сетевых графиков (сетевых моделей) процессов приведения составных частей РКК в готовность к применению и вопросы оценки эффективности и расчета основных временных характеристик технологических процессов подготовки элементов ракетно-космического комплекса к применению.

Ключевые слова:

ракетно-космического комплекс; сетевой график; сетевая модель; характеристики сетевой модели.

Процесс приведения ракетно-космического комплекса (РКК) в готовность к применению является сложным технологическим процессом, который осуществляется в строгом соответствии с технологией, изложенной в эксплуатационной документации (ЭД). На основе анализа процесса приведения РКК в готовность к применению, составляется сетевой график (сетевая модель) процесса приведения РКК в готовность к применению из установленных степеней готовностей. Степень детализации сетевой модели доводится до операции или этапа подготовки (совокупности операций).

Сетевой график (сетевая модель) — это графическое изображение процесса выполнения некоторой совокупности работ, наглядно отражающее взаимозависимости между этими работами. В нем детально или укрупнено показывается, какие работы, в каком порядке и за какое время необходимо выполнить, чтобы обеспечить окончание процесса подготовки РКК не позже заданного срока.

Сетевая модель представляет собой ориентированный ациклический граф:

$$G = (X, A), \quad (1)$$

где: X — множество событий или вершин ориентированного ациклического графа;

A — множество дуг, отображающих этапы работ.

Основными элементами сетевого графика являются работы и события.

Работы в сетевых графиках изображаются стрелками. Сплошными стрелками изображаются действительные работы и ожидания, а пунктирными — фиктивные работы.

События в сетевых графиках обозначаются кружками.

Представление процесса приведения РКК в готовность к применению в виде сетевой модели (сети) применяется в том случае, когда для достижения заданного результата должна быть выполнена строго упорядоченная последовательность операций.

Процесс приведения РКК в готовность к применению имеет ряд характерных особенностей:

- содержит определенную совокупность операций, выполнение которой означает завершение всего процесса;
- длительности отдельных операций, как правило, являются случайными величинами с известными функциями распределения;
- операции строго упорядочены, то есть должны выполняться в определенной последовательности;
- в случае прерывания любой операции вследствие обнаружения неисправности, она должна быть повторена в полном объеме.

При построении сетевых графиков процесса подготовки космического аппарата (КА) и ракеты-носителя (РН) к запуску, используются следующие правила:

- в сети не должно быть событий, из которых не выходит ни одной работы, если только эти события не являются для данной сети исходными;
- в сети не должно быть замкнутых контуров, то есть не должно быть путей, соединяющих какое-либо событие с ним же самим;
- в сети не должно быть событий или работ, имеющих одинаковые номера (то есть работ с общими начальными и конечными событиями);
- если какие-либо работы в сети могут быть начаты до полного окончания непосредственно предшествующей им работы, то эта последняя должна быть расчленена на такие последовательно выполняемые работы, результаты которых необходимы и достаточны для начала необходимых работ;

— если для выполнения какой-либо работы необходимо получить результаты не всех входящих в ее начальное событие работ, а только части из них, то для данной работы нужно ввести в сеть новое начальное событие, которое являлось бы конечным только для указанной части работ и соединить это новое событие с прежним начальным событием фиктивной работой.

Сетевая модель процесса приведения РКК в готовность к применению, задаваемая графом $G=(X,A)$, имеет следующую структуру:

- каждая дуга, отображающая соответствующую операцию, имеет определенную ориентацию;
- граф процесса приведения РКК в готовность к применению является бесконтурным;
- не допускается вероятностное ветвление;
- какая-либо операция не может начаться раньше, чем будут завершены все предыдущие операции;
- всегда можно поместить каждую операцию так, чтобы ее ориентированная дуга начиналась в вершине, имеющей меньший номер, чем вершина, в которой она заканчивается;
- любые два события могут быть непосредственно соединены не более чем одной дугой.

Основными характеристиками сетевых графиков являются: ранние и поздние сроки наступления событий, резервы времени наступления событий, время выполнения всего комплекса работ, отображаемых сетевым графиком, и резервы времени выполнения работ.

Исходными данными для определения этих характеристик являются сведения о времени выполнения отдельных работ, для определения которого используют либо детерминированный, либо вероятностный подход.

При использовании детерминированного подхода время выполнения работы считается неслучайной величиной и дается его однозначная оценка. Этот подход может быть применен только тогда, когда имеются нормы времени на выполнение работ моделируемого процесса, или когда разброс времени выполнения работ пренебрежимо мал.

Рассмотрим сетевую модель $G=(X,A)$ с множеством событий $\{x\}$ и множеством операций $\{a\}$. Предположим, что граф G содержит ровно одно событие, в которое не входит ни одна дуга, и ровно одно событие, из которого не выходит ни одна дуга. Эти события, соответственно, являются начальным и конечным. Отсутствие контуров в G позволяет пронумеровать события таким образом, чтобы для каждой дуги, соединяющей событие i и

событие j и обозначаемой (ij) , соблюдалось условие $i < j$. Обозначим время, необходимое для операции (ij) , через $t(i,j)$.

Для каждого события $x \in X$ пусть $E(x)$ обозначает наиболее ранний из возможных сроков его наступления, а $L(x)$ - наиболее поздний срок наступления события x , еще допускающий своевременное окончание всего процесса приведения РКК в готовность к применению.

В общем случае:

$$E(j) = \max \{E(i) + t(i,j)\}, \quad (2)$$

$$L(i) = \min \{L(j) - t(i,j)\}. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) дают возможность построить алгоритм расчета наиболее ранних и наиболее поздних сроков всех событий сетевой модели.

Увеличение наиболее позднего срока окончания процесса приведения РКК в готовность к применению - $L(N)$ на t единиц приведет к увеличению наиболее поздних сроков для всех событий также на t единиц.

Наиболее ранний срок $E(x)$ события x можно интерпретировать, как длину пути наибольшей длины от начального события к событию x , а разность $L(N) - L(x)$ - как длину пути наибольшей длины от события x к конечному событию.

Рассмотрим некоторую операцию (i,j) . Операция (i,j) может начаться не ранее $E(i)$ и должна закончиться не позднее $L(j)$. Таким образом, без задержки окончания процесса приведения РКК в готовность к применению на выполнение операции (ij) можно выделить не более $[L(j) - E(i)]$ единиц времени. Следовательно, при выполнении этой операции можно допустить максимальную задержку:

$$L(j) - E(i) - t(i,j) > 0. \quad (4)$$

Величина

$$RP(i,j) = L(j) - E(i) - t(i,j), \quad (5)$$

называется полным резервом времени операции (i,j) .

Задержка выполнения операции, полный резерв времени которой равен нулю, приведет к такой же по времени задержке выполнения процесса приведения РКК в готовность к применению.

Определим максимальное количество времени, которое может быть выделено для выполнения операции (i,j) без введения дополнительных временных ограничений на последующие операции. Для соблюдения этого условия операция (i,j) должна быть закончена к моменту времени $E(j)$.

Поскольку операция (i,j) может начаться не раньше $E(i)$, на ее выполнение без введения дополнительных временных ограничений на последующие операции можно выделить не более $[E(j) - L(i)]$ единиц времени.

Величина

$$RS(i, j) = E(j) - L(i) - t(i, j), \quad (6)$$

называется свободным резервом времени операции (i,j) .

Свободный резерв времени равен максимальной задержке выполнения операции (i,j) , не влияющей на выполнение последующих операций.

Операция называется критической, если любая задержка в ее выполнении приводит к задержке выполнения всего процесса приведения РКК в готовность к применению, то есть критическая операция — это операция, полный резерв времени которой равен нулю. Путь в сетевом графике, состоящий только из критических операций, является критическим путем. Если в сети нет резервов времени, то все пути являются критическими.

Параметры сетевой модели процесса приведения РКК в готовность к применению могут быть рассчитаны по формулам (2 - 6) в предположении, что разброс времени выполнения операций пренебрежимо мал.

В том случае, когда длительность выполнения операций является случайной величиной, для оценки параметров модели могут использоваться различные статистические оценки.

Методика определения математического ожидания времени выполнения отдельной работы зависит от закона распределения времени ее выполнения. Необходимо подобрать такой закон распределения, который отражал бы особенности выполнения работ при приведении РКК в готовность к применению. Особенности, существенными для выбора закона распределения, являются следующие:

— время выполнения любой работы ограничено как сверху, так и снизу, то есть всегда можно указать максимальное время t_{max} , в течение которого работа может быть выполнена, несмотря на стечение самых неблагоприятных обстоятельств, и минимальное время t_{min} , которое понадобится для выполнения работы при наиболее благоприятном стечении обстоятельств;

время выполнения работы может принять любое значение в интервале

$[t_{min}, t_{max}]$, то есть является непрерывной случайной величиной;

— среди комплекса работ, выполняемых при приведении РКК в готовность к применению, могут встречаться работы, время выполнения которых зависит от большого числа случайных факторов, каждый из которых в отдельности является

малосущественным, а также работы, на выполнение которых оказывает влияние небольшое число важных факторов.

Первая особенность требует, чтобы закон распределения был усеченным на интервале $[t_{min}, t_{max}]$, вторая требует непрерывности закона распределения, а третья требует, чтобы закон распределения был таким, при котором наиболее вероятное значение времени выполнения работы могло располагаться в любом месте интервала.

Кроме рассмотренных требований, к закону распределения времени выполнения работы предъявляется также требование одновышинности, так как «одновышинные» законы распределения имеют наиболее широкое распространение из-за их относительной простоты и наиболее полной изученности.

Среди практически применяемых законов распределений, отвечающих этим требованиям, наибольшей гибкостью обладает бета-распределение [1]. Именно это распределение чаще всего и применяют при необходимости произвести вероятностную оценку времени выполнения различных работ.

Пример сетевого графика подготовки составной части РКК – космического аппарата (КА) в готовность к применению представлен на рисунке 1.

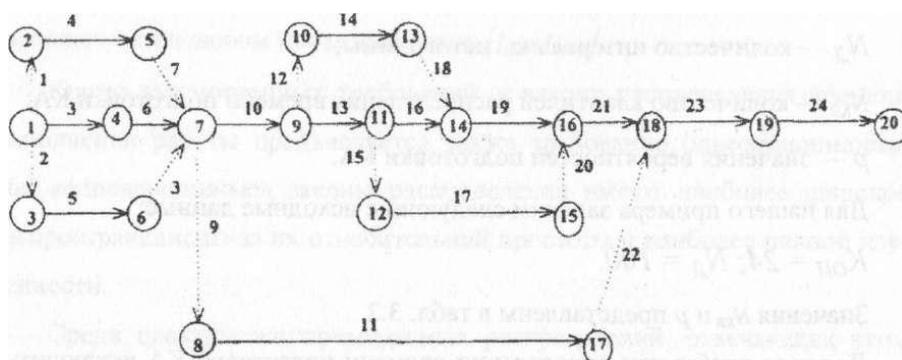


Рисунок 1- Сетевой график процесса подготовки КА к запуску

Исходными данными для расчета временных характеристик этого сетевого графика являются:

- i, j — номера событий графика подготовки КА;
- k — номер операции графика подготовки КА;
- $m(i, j)$ — оценка математического ожидания времени выполнения (i, j) операции;
- $\sigma^L\{i, j\}$ — оценка дисперсии времени выполнения (i, j) операции;
- $t_{min}(i, j)$ — минимальное значение времени выполнения (i, j) операции;
- $t_{max}(i, j)$ — максимальное значение времени выполнения (i, j) операции;

N — число испытаний (измерений времени выполнения операции процесса подготовки КА).

Кроме перечисленных исходных данных для расчета временных характеристик исходными данными также являются:

$N_{ц}$ — количество циклов моделирования;

$K_{оп}$ — количество операций сетевого трафика подготовки КА;

$N_{д}$ — количество интервалов гистограммы;

$N_{кв}$ — количество квантилей распределения времени подготовки КА;

p — значения вероятностей подготовки КА.

Рассчитанные на основании вышеперечисленных исходных данных временные характеристики процесса позволяют построить график функции распределения времени подготовки КА к применению.

Библиографический список

1. Прохорович В.Е. Прогнозирование состояния сложных технических комплексов. СПб.: Наука, 1999. 158 с.
2. Мусабаев Т.А., Калинин С.Ю. Системы контроля и эксплуатации ракетно космических комплексов. – М.: «МАТИ» – РГТУ им. Циолковского, 2002. – 186 с.: илл.
3. Лысенко И.В. Анализ и синтез сложных технических систем. Ч.1. Анализ и синтез систем обеспечения готовности ракет-носителей и космических аппаратов к запуску. М.: Воениздат, 1995. 368 с.
4. Калинин. В.Н., Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. с. 149-156.

Сведения об авторах

Мусабаев Талгат Амангельдиевич, председатель Национального космического агентства Республики Казахстан, д.т.н., профессор, e-mail:rassiec@mail.ru

Недайвода Анатолий Константинович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.т.н., e-mail:rassiec@mail.ru

Шленов Юрий Викторович, заведующий кафедрой Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.э.н., профессор,
e-mail:info@itbu.ru