

Г.А. Еланцев

## Применение программного средства Agena для имитационного моделирования стохастических сетевых графов

*В статье рассмотрен подход, основанный на имитационном моделировании стохастического сетевого графа, описывающего процесс разработки образца вооружения, военной и специальной техники, который позволяет определять статистическую функцию распределения продолжительности разработки.*

Появление и широкое практическое применение методов сетевого планирования (CPM, PERT и др.) объясняется удобством планирования организационных процессов (работ) в условиях временных, материальных и людских ограничений.

В основе подхода, реализованного в методах сетевого планирования, лежит представление совокупности выполняемых работ в виде графа, вершинами которого являются события, а дугами – работы.

В зависимости от характера описываемых работ различают детерминированные и стохастические сетевые графы. Детерминированными графами описываются организационные процессы с детерминированными продолжительностями работ, а стохастическими – процессы со случайными продолжительностями работ.

Сетевое моделирование – логико-временная имитация порядка выполнения работ (плана), применяемая для оценки качества плана по определенным показателям. Результатом сетевого моделирования должен являться синтез оптимального плана выполнения работ по заданному критерию.

В данной статье сетевое моделирование рассматривается применительно к планированию жизненного цикла вооружения и военной техники (ВВТ). В связи с тем, что работы, выполняемые на разных стадиях жизненного цикла, как правило, не могут быть выполнены точно в заранее определенный срок, их длительности можно считать случайными величинами. Таким образом, жизненный цикл ВВТ может быть описан стохастическим сетевым графом.

В настоящее время для оценки времени выполнения комплекса работ со случайными продолжительностями используются следующие подходы и методики.

1. Подход, основанный на вычислении критического пути (пути с максимальным значением продолжительности) на основе суммирования случайных продолжительностей работ, составляющих отдельные пути сетевого графа, первоначально описанный в монографии [1].

В соответствии с данным подходом в основе выбора критического пути лежит вычисление вероятностей выполнения работ за заданное (директивное) время. Принимается, что путь, для которого вероятность минимальна, является критическим, т. е. путем, ограничивающим продолжительность выполнения всех работ сети, и, при необходимости, предпринимаются меры по сокращению этого критического пути [2].

2. Методика построения функции распределения времени завершения комплекса работ, описанная в работе [2].

В соответствии с ней единственной характеристикой качества стохастической сети, содержащей полную информацию о времени выполнения всего комплекса работ сети, является закон распределения этого времени, рассчитываемый с учетом реальной взаимосвязи работ, в том числе с учетом возможных задержек выполнения работ на всех путях сети.

При таком подходе вместо понятия критического пути, справедливого лишь для детерминированного случая, возможно введение и

применение понятия критической работы. Критической работой стохастической сети является та работа, которая в наибольшей степени влияет на закон распределения времени завершения всех работ сети [2].

3. Имитационное моделирование сетевого графа.

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируются явления, состав-

ляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы [3].

В таблице 1 рассмотрены особенности подходов и методик, используемых для анализа сетевых графов со случайными продолжительностями работ, их достоинства и недостатки.

Таблица 1 – Подходы и методики, применяемые для анализа стохастических сетевых графов

№ п/п	Подход, методика	Особенности	Достоинства	Недостатки
1.	Вычисление критического пути на основе суммирования случайных продолжительностей работ, составляющих отдельные пути сетевого графа.	Показатель продолжительности пути заимствован из детерминированных моделей (рассчитывается на основе сумм продолжительностей работ).	Позволяет получить приближенную экспресс-оценку продолжительности выполнения комплекса работ сети.	Недостаточно теоретически обоснован, так как не учитывает взаимное влияние путей, обусловленное наличием в графе сети событий, являющихся фактом завершения одновременно нескольких независимых работ.
2.	Методика построения функции распределения времени завершения комплекса работ.	Время завершения всего комплекса работ сети описывается в виде закона распределения.	Методика позволяет учесть взаимное влияние путей, обусловленное наличием в графе сети событий, являющихся фактом завершения одновременно нескольких независимых работ.	Необходимость вычисления большого количества определенных интегралов требует значительных временных затрат.
3.	Имитационное моделирование сетевого графа.	Имитационная модель воспроизводит процесс функционирования системы во времени.	Позволяет по исходным данным о продолжительности работ, задаваемых любыми законами распределения, определить статистические параметры времени завершения всего комплекса работ сети.	Необходимость предварительного построения имитационной модели.

Преимуществами имитационного моделирования функционирования стохастической сети перед аналитической методикой построения функции распределения времени завершения всего комплекса работ, рассмотренной в работе [2], являются:

высокая скорость вычислений ввиду отсутствия необходимости вычисления большого количества определенных интегралов;

применимость к сложным моделям с различными законами распределения продолжительностей работ;

простота построения сетевого графа, его изменения и масштабирования.

В соответствии с ГОСТ РВ 15.004-2004 типовой жизненный цикл образцов (систем, комплексов) ВВТ включает следующие стадии:

- 1) исследование и обоснование разработки;
- 2) разработка;
- 3) производство;
- 4) эксплуатация изделий;
- 5) капитальный ремонт (для изделий, подлежащих капитальному ремонту).

Для каждой стадии жизненного цикла определены типовые работы на ней выполняемые. В рамках данного исследования рассмотрены первые три стадии.

1 Исследование и обоснование разработки.

1.1 Проработки заказчика и исполнителей работ.

1.2 Научно-исследовательская работа (НИР) по созданию изделия.

1.3 Выполнение аванпроекта.

2 Разработка.

2.1 Опытно-конструкторская работа (ОКР) по созданию изделия (модернизации изделия).

3 Производство.

3.1 Постановка на производство изделий.

3.2 Установившееся промышленное производство изделий.

3.3 Строительство, монтаж, сборка и наладка изделий.

3.4 Поставка изделий.

3.5 Снятие с производства изделий

В соответствии с рассмотренным типовым содержанием работ, выполняемых на стадиях жизненного цикла образцов (систем, комплексов) ВВТ разработана сетевая модель, описывающая процесс разработки условного комплекса ВВТ (рисунок 1).

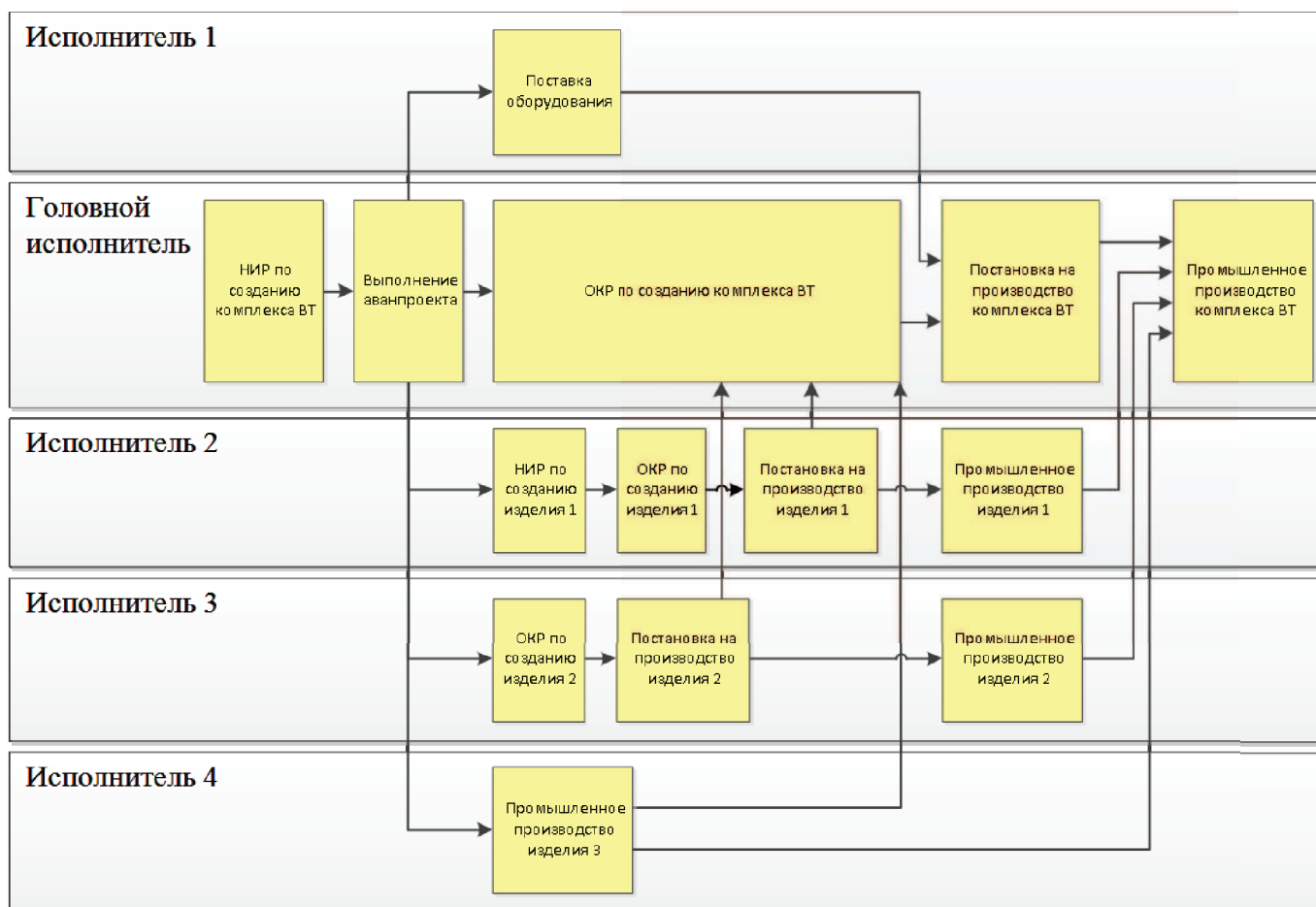


Рисунок 1 – Сетевая модель разработки условного комплекса ВВТ

В рамках представленной модели рассматриваются типовые работы с 1.2 по 3.2. Принимается, что данный условный комплекс ВВТ целесообразно разрабатывать в составе кооперации, включающей головного исполнителя и четырех исполнителей составных частей.

Исполнитель 1 является поставщиком оборудования (например, станков) для постановки на производство комплекса ВВТ головным исполнителем.

Исполнители 2-3 являются разработчиками и поставщиками, а исполнитель 4 – только поставщиком, узлов и агрегатов (изделие 1,

изделие 2, изделие 3) комплекса ВВТ, разрабатываемого головным исполнителем, например, силовой установки, радиоэлектронного оборудования и т. д.

Для оценки времени завершения комплекса работ по разработке условного комплекса

ВВТ сетевая модель, представленная на рисунке 1, реализована в программном средстве имитационного моделирования Arena.

Разработанная модель представлена на рисунке 2. В ней можно выделить следующие основные модули.

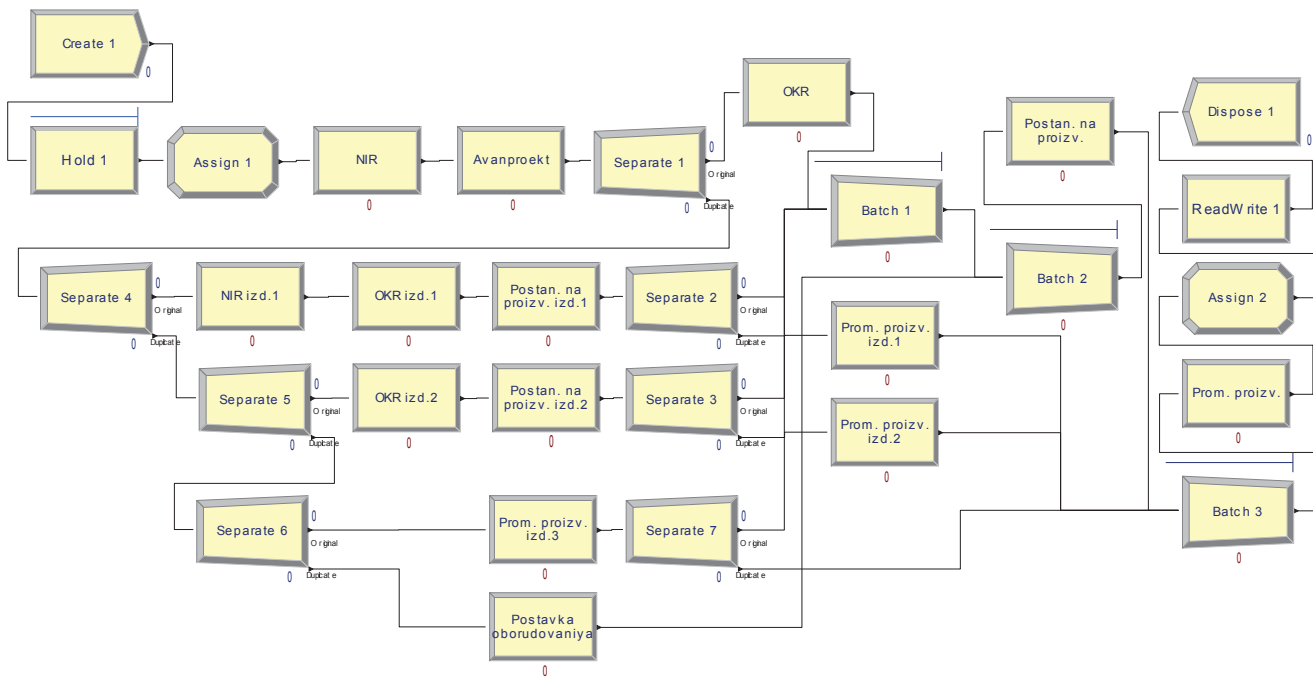


Рисунок 2 – Имитационная модель разработки условного образца (системы, комплекса) ВВТ

1. Инициализации и окончания моделирования:
  - Create 1;
  - Dispose 1.
2. Создания копии заявки Separate 1 – Separate 7.
3. Группировки заявок Batch 1 – Batch 3.
4. Обработки заявок:
  - НИР по созданию комплекса ВВТ;
  - выполнение аванпроекта;
  - НИР по созданию изделия 1;
  - ОКР по созданию комплекса ВВТ;
  - ОКР по созданию изделия 1;
  - ОКР по созданию изделия 2;
  - постановка на производство комплекса ВВТ, изделия 1, изделия 2;
  - поставка оборудования для организации производства;
  - промышленное производство комплекса ВВТ, изделия 1, изделия 2, изделия 3.

4. Оценки продолжительности разработки комплекса ВВТ:

- замер временного интервала;
- вывод информации в файл.

Как показано в [1], в большинстве случаев для описания случайных продолжительностей работ приемлемым является бета-распределение. Данное распределение положительно и имеет функцию плотности, напоминающую закон Гаусса, но ограниченную слева и справа. Случайные продолжительности работ разработанной имитационной модели заданы бета-распределениями (таблица 2). При этом параметры закона распределения продолжительности НИР и ОКР определены на основе статистических данных по срокам проведения соответствующих работ, выполняемых в рамках ГОЗ (рисунок 3).

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования

Продолжительность, лет	Параметры бета-распределения		
	$\alpha$	$\beta$	Интервал
НИР по созданию комплекса ВВТ	3	8	[1; 9]
выполнение аванпроекта	2	5	[0,2; 1]
НИР по созданию изделия 1	3	8	[1; 6]
ОКР по созданию комплекса ВВТ	4	20	[1; 19]
ОКР по созданию изделия 1 и изделия 2	4	20	[1; 10]
постановка на производство комплекса ВВТ, изделия 1, изделия 2	2	2	[0,5; 2]
поставка оборудования для организации производства	2	5	[0,5; 1]
промышленное производство комплекса ВВТ	3	10	[1; 5]
промышленное производство изделия 1, изделия 2, изделия 3	2	5	[2; 5]

В качестве оцениваемой продолжительности разработки условного комплекса ВВТ принимается случайная величина  $T$ , характеризующая время выполнения всего комплекса работ рассмотренной сетевой модели. Для определения теоретического распределения

этой случайной величины с использованием разработанной имитационной модели было проведено 10 000 испытаний, по результатам которых получена статистическая функция распределения с параметрами  $M[T]=12,97$ ;  $\sigma=1,52$ .



Рисунок 3 – Статистические данные о продолжительности выполнения НИР и ОКР в рамках ГОЗ

Наиболее точно аппроксимирующим теоретическим распределением (коэффициент корреляции  $r=0,998$ ) полученной статисти-

ческой функции является бета-распределение с параметрами  $\alpha=6,35$ ;  $\beta=7,2$  (рисунок 4).

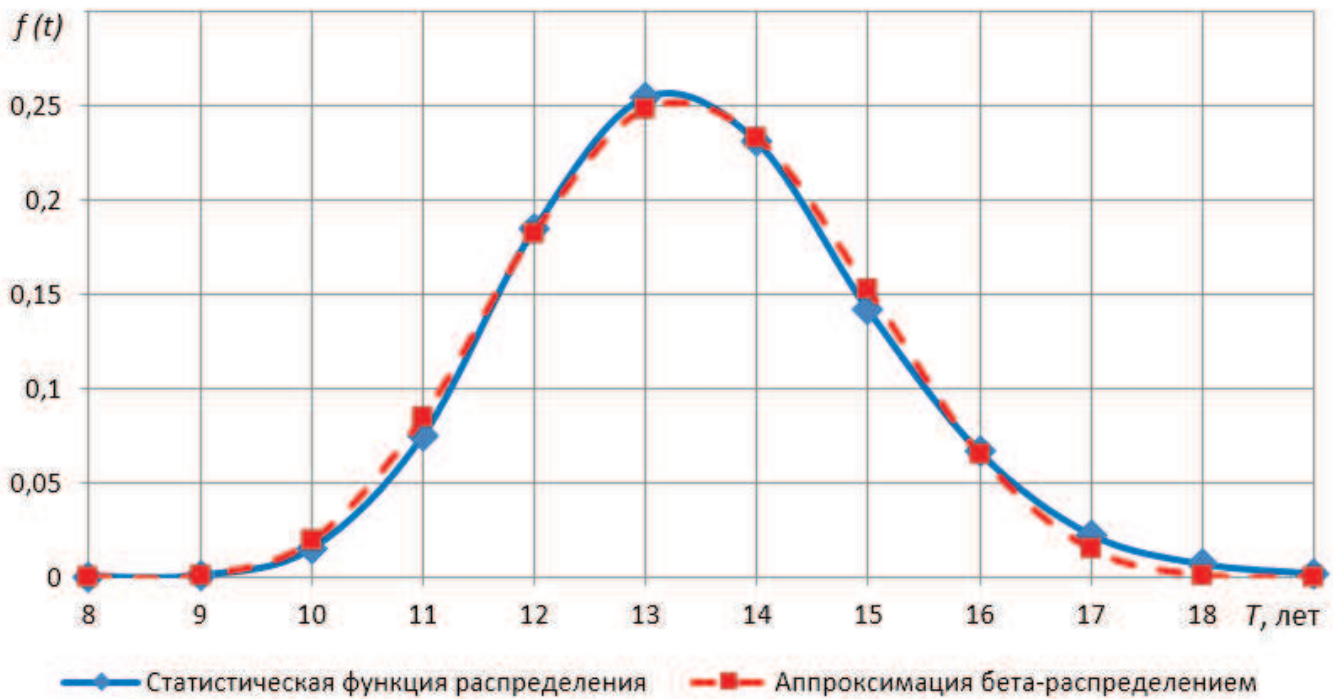


Рисунок 4 – Функция плотности распределения продолжительности разработки условного комплекса ВВТ

Таким образом, продолжительность разработки условного комплекса ВВТ при заданных исходных данных составит около  $13 \pm 1,5$  лет и может быть описана бета-распределением. Безусловно, не все образцы (системы, комплексы) ВВТ будут характеризоваться такими параметрами продолжительности разработки. Однако предложенный подход является универсальным. Если для определения законов распределения продолжительностей проведения работ, входящих в сетевую модель, анализировать статистические данные продолжительностей только тех работ по разработке образцов (систем, комплексов) ВВТ, которые направлены (были направлены) на разработку ВВТ аналогичного класса (типового ряда), то можно оценить продолжительность разработки подобного образца (системы, комплекса) ВВТ в будущем. При этом, внося соответствующие изменения в сетевую модель, можно рассмотреть альтернативные варианты кооперации разработчиков ВВТ.

В качестве примера рассмотрим как изменится продолжительность разработки условного комплекса ВВТ при уменьшении продолжительности проведения ОКР исполнителями составных частей. Зададим продолжительности ОКР по созданию изделия 1 и изделия 2 случайной величиной, имеющей бета-распределение на отрезке  $[1; 3]$  с параметрами  $\alpha=2$ ,  $\beta=5$ . При моделировании с такими исходными данными получена статистическая функция распределения с параметрами  $M[T]=12,12$ ;  $\sigma=1,44$  (рисунок 5). Таким образом, уменьшение максимальной продолжительности проведения ОКР исполнителями составных частей на семь лет привело к незначительному (около 1 года) уменьшению средней продолжительности разработки условного комплекса ВВТ. Это объясняется большой продолжительностью ОКР, выполняемой головным исполнителем, максимальная продолжительность которой осталась неизменной и равной 19 годам.

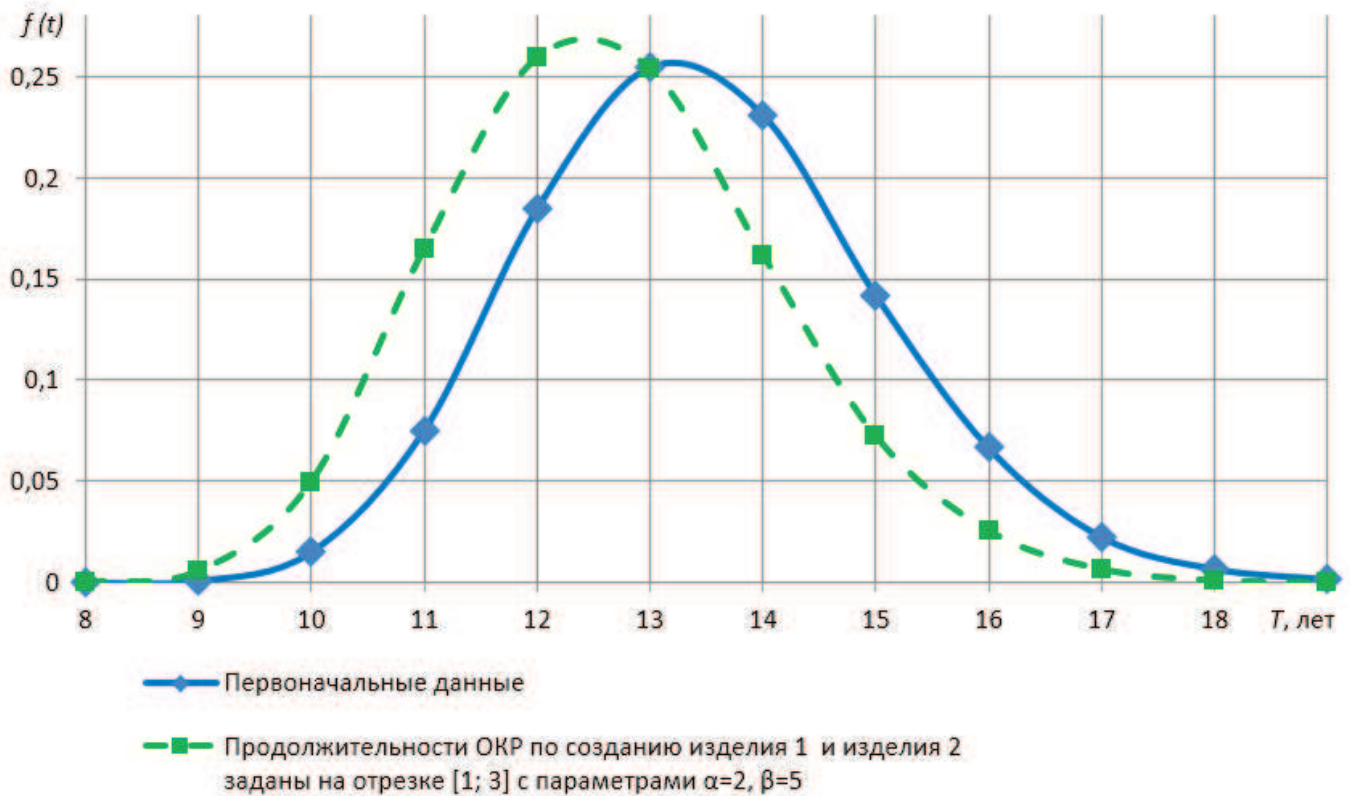


Рисунок 5 – Изменение продолжительности разработки условного комплекса ВВТ при сокращении продолжительности ОКР по созданию изделия 1 и изделия 2

Предложенный подход может быть использован в рамках создаваемой системы управления полным жизненным циклом вооружения, военной и специальной техники

для оценки продолжительности разработки, влияния структуры кооперации и технологических возможностей ее участников на продолжительность работ.

**Список использованных источников**

1. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования / Пер. с франц. – М.: Прогресс, 1968. – С. 77-87.
2. Горевич Б.Н. Применение стохастических сетевых графов для планирования комплекса работ в условиях неопределенности // Вооружение и экономика. – 2014. – № 4(29).
3. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. Классика CS. / 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: ВНУ, 2004. – 847 с.