Научная статья
УДК 623.419

Оценка реализуемости мероприятий развития сложных военно-технических систем на основе стохастических сетевых методов

Андрей Александрович Мунтяну

Аннотация. В статье рассмотрен подход к оценке значений показателей реализуемости мероприятий государственной программы вооружения, основанный на комбинированном применении стохастических сетевых методов. Идея предлагаемого подхода заключается в оценке значений показателей реализуемости отдельных независимых программных мероприятий посредством моделирования хода их выполнения на основе применения математического аппарата альтернативного сетевого планирования. В последующем получаемые оценки используются в марковской модели, имитирующей процесс выполнения всей рассматриваемой совокупности мероприятий. В заключении статьи кратко изложены наиболее распространенные подходы к выработке научно обоснованных решений по повышению реализуемости мероприятий государственной программы вооружения.

Ключевые слова: государственная программа вооружения; программное мероприятие; сложная военно-техническая система; реализуемость; сетевая модель

Для цитирования: Мунтяну А.А. Оценка реализуемости мероприятий развития сложных военно-технических систем на основе стохастических сетевых методов // Вооружение и экономика. 2025. №1(71). С. 51-66.

Original article

Assessment of the Development Feasibility Measures for Complex Military-Technical Systems Based on Stochastic Network Methods

Andrei A. Muntianu

Abstract. The article considers an approach to assessing the feasibility indicators values of the state armament program activities, based on the combined use of stochastic network methods. The idea of the proposed approach is to assess the values of feasibility indicators of the individual independent program activities by modeling of their implementation progress based on the mathematical apparatus application of alternative network planning. Subsequently, the obtained estimates are used in a Markov model simulating the process of the entire set of activities under consideration. In conclusion, the article briefly outlines the most common approaches to scientifically sound solutions development to improve the feasibility of the state armament program activities.

Keywords: state armament program; program event; complex military-technical system; feasibility; network model

For citation: Muntianu A.A. Assessment of the Development Feasibility Measures for Complex Military-Technical Systems Based on Stochastic Network Methods. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2025;71(1): 51-66. (In Russ.).

Современная военно-политическая обстановка характеризуется резким обострением межгосударственных отношений мировых и региональных центров силы, усилением их конфронтации и борьбы за лидерство в военной, ресурсной и технологической сферах, а также активизацией старых и появлением новых территориальных разногласий между странами, разрешение которых проводится в том числе и силовыми способами.

Такие условия обусловливают наличие военных опасностей, которые способны перерасти в угрозы военной безопасности Российской Федерации. Их парирование, в свою очередь, не может осуществляться без оснащения Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) современными и высокоэффективными ударными, информационно-управляющими и обеспечивающими образцами вооружения и военной техники (ВВТ), функционально взаимосвязанная совокупность которых образует различные сложные военно-технические системы (СВТС), в том числе и межвидового назначения.

Достижение рационального состава и характеристик СВТС осуществляется путем планирования и реализации мероприятий[1] государственной программы вооружения (ГПВ), своевременность и полнота выполнения которых определяется сроками и порядком их

[1] Далее – программных мероприятий.

© Мунтяну А.А., 2025

проведения, уровнем ресурсно-экономического обеспечения, возможностями (научно-техническими, производственно-технологическими и др.) потенциальных исполнителей и многими другими факторами.

В настоящее время в рамках существующей схемы формирования предложений в проект ГПВ [1; 2] оценка реализуемости[2] программных мероприятий является важнейшим этапом военно-экономического анализа, в том числе на основе результатов проведения которой осуществляется выработка научно обоснованных предложений и рекомендаций органам государственного и военного управления по направлениям и вариантам технического оснащения ВС РФ.

Анализ различных источников [3-7] показывает, что при обособленном рассмотрении отдельных программных мероприятий, направленных на создание, производство или ремонт образцов ВВТ, их реализуемость традиционно рассматривается в пяти направлениях:

1) *ресурсно-экономическом*, напрямую связанным с финансово-хозяйственной деятельностью предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК), данными их аудита и рентабельностью, а также обеспеченностью предприятий ОПК необходимыми ресурсами, материалами и сырьем;

2) *научно-техническом*, в рамках которого учитывается и оценивается располагаемый предприятиями ОПК научно-технический задел (НТЗ) по ВВТ, возможности их лабораторно-экспериментальной базы и пр.;

3) *производственно-технологическом*, отражающим состояние (готовность) производственной базы предприятий ОПК и располагаемые у них мощности по производству и ремонту ВВТ;

4) *управленческом*, характеризующим уровень компетенции руководящего состава предприятий ОПК и их способность организовать кооперационное и межведомственное взаимодействие в целях достижения необходимого результата при выполнении работ;

5) *кадровом*, отражающим достаточность и квалифицированность научного, инженерного, рабочего и др. персонала на предприятиях ОПК для реализации сформированных конструктивных и технологических замыслов и идей в конкретных образцах ВВТ.

Необходимо отметить, что в рамках оценивания реализуемости некоторой совокупности программных мероприятий, направленных на развитие СВТС, полный учет и оперирование показателями по отмеченным составляющим может усложнить выработку решений о включении тех или иных работ в проект ГПВ. Вне зависимости от целевой направленности программных мероприятий в качестве наиболее представительных и универсальных, но не единственных показателей их реализуемости, учитывающих не только организационные, временные, финансовые, технологические и другие аспекты их выполнения, но также и стохастическую природу данного процесса, являются:

1) вероятность завершения выполнения (полного и качественного) составного этапа программного мероприятия в плановый срок[3]:

$$p_l^{\text{В}} = f\left(k, \text{S}^{\text{ВВТ}}, \text{H}^{\text{ВВТ}}, \text{Y}^{\text{ОПК}}, \text{G}^{\text{ОПК}}, \text{D}^{\text{ОПК}}, \Delta t_l^{\text{В}}, Z\right), l = 1, \ldots, L, \quad (1)$$

где: l – номер составного этапа программного мероприятия;

L – общее количество составных этапов программного мероприятия;

k – тип программного мероприятия (научно-исследовательская работа, опытно-конструкторская работа, производство ВВТ, модернизация ВВТ, ремонт ВВТ, работы по продлению сроков эксплуатации);

$\text{S}^{\text{ВВТ}}$ – состав образца ВВТ, связанного с программным мероприятием;

$\text{H}^{\text{ВВТ}}$ – тактико-технические характеристики образца ВВТ;

---

[2] В статье под «*реализуемостью*» программных мероприятий понимается возможность их выполнения в заданные сроки, в полном объеме и с требуемым качеством в рамках располагаемых финансовых ресурсов.

[3] При условии, что выделенный объем финансовых, материальных и др. видов ресурса соответствует требуемому.

$\text{Y}^{\text{ОПК}}$ – кооперация исполнителей программного мероприятия (предприятий ОПК, являющихся потенциальными исполнителями);
$\text{G}^{\text{ОПК}}$ – располагаемый предприятиями ОПК НТЗ по образцу ВВТ;
$\text{D}^{\text{ОПК}}$ – опыт участия предприятий ОПК в выполнении аналогичных работ;
$\Delta t_l^{\text{В}}$ – плановый срок выполнения составного этапа программного мероприятия;
Z – другие факторы, определяющие реализуемость составных этапов программного мероприятия;

2) вероятность завершения выполнения программного мероприятия в плановый срок:

$$p^{\text{У}} = f\left(L, p_l^{\text{В}}, \text{N}^{\text{Э}}\right), l = 1, \ldots, L, \quad (2)$$

где: $\text{N}^{\text{Э}}$ – матрица связности (организационной и технологической) составных этапов программного мероприятия.

Показатели $q_l^{\text{В}}$ и $q^{\text{У}}$ являются обратными по отношению к показателям $p_l^{\text{В}}$ и $p^{\text{У}}$ соответственно. Они характеризуют вероятности срыва выполнения составного этапа или программного мероприятия в целом:

$$q_l^{\text{В}} = 1 - p_l^{\text{В}}, \quad (3)$$

$$q^{\text{У}} = 1 - p^{\text{У}}. \quad (4)$$

Если развитие СВТС осуществляется на основе выполнения независимых друг от друга программных мероприятий или нескольких независимых групп[4] программных мероприятий, то в качестве агрегированного показателя реализуемости целесообразно рассматривать вероятность завершения выполнения программных мероприятий или их составных этапов[5] в определенный момент времени:

$$P_{\text{СВТС}}^{\text{У}}(t) = f\left(\Pi^{\text{СВТС}}, \Delta t_i^{\text{В}}, p_i^{\text{У}}, \text{B}^{\text{М}}, \Delta\text{T}\right), i = 1, \ldots, I, \quad (5)$$

$$\Pi^{\text{СВТС}} = (\text{п}_1, \text{п}_2, \text{п}_3, \ldots, \text{п}_i, \ldots, \text{п}_I), \quad (6)$$

$$\Delta\text{T} = \left\{t^{\text{Н}}, 2, 3, \ldots, t, \ldots, t^{\text{К}}\right\}, \quad (7)$$

где: $\Pi^{\text{СВТС}}$ – перечень программных мероприятий развития СВТС;
i – номер программного мероприятия;
I – количество программных мероприятий;
п_i – программное мероприятие развития СВТС;
$\Delta t_i^{\text{В}}$ – плановый срок выполнения программного мероприятия;
$p_i^{\text{У}}$ – вероятность завершения выполнения i-го программного мероприятия в плановый срок;
$\text{B}^{\text{М}}$ – матрица связности (организационной и технологической) программных мероприятий развития СВТС внутри независимой группы;
ΔT – рассматриваемый период развития СВТС;
$t^{\text{Н}}$ – год начала выполнения программных мероприятий развития СВТС;
t – единичный дискретный момент времени;
$t^{\text{К}}$ – год завершения выполнения программных мероприятий развития СВТС.

Оценивание значений вышеперечисленных показателей реализуемости программных мероприятий может проводиться на основе формирования и анализа параметров различных экономико-математических моделей, наиболее распространенными из которых

[4] В статье под «*группой программных мероприятий*» понимается их организационно и технологически взаимосвязанная совокупность, имеющая одну или несколько общих конечных целей выполнения. В качестве группы программных мероприятий, например, могут рассматриваться: работы по созданию образца ВВТ, его последующему серийному производству и ремонту (сервисному обслуживанию); работы по созданию технологически сложного образца ВВТ, проводимые в форме нескольких взаимосвязанных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Реализуемость группы программных мероприятий может характеризоваться показателями, идентичными независимому программному мероприятию.

[5] В случае, если завершение программного мероприятия запланировано позже рассматриваемого момента времени.

в практике военного планирования являются стохастические сетевые модели. Они позволяют разрабатывать, анализировать и оптимизировать развитие СВТС в аспекте их долгосрочного функционирования.

В данной статье предлагается рассмотреть подход, основанный на двухэтапном моделировании процесса развития СВТС. На первом этапе моделируется ход выполнения каждого независимого программного мероприятия или группы программных мероприятий.

Математическим базисом проводимого моделирования на данном этапе выступает метод разработки обобщённой альтернативной сети операций[6] (метод GAAN), который относится к методам альтернативного сетевого планирования [9; 10] и является дальнейшим развитием таких методов как оценки и пересмотра программ (PERT) и графической оценки и анализа (GERT).

На основе модели типа GAAN определяются значения показателей $p_l^{\text{В}}$, $q_l^{\text{В}}$, $p^{\text{У}}$ и $q^{\text{У}}$, которые на втором этапе используются в качестве исходных данных для формирования и анализа динамической модели развития СВТС в форме конечной неоднородной марковской цепи.

Особенности формирования и анализа модели выполнения программных мероприятий на основе метода GAAN

Отличительной особенностью альтернативных сетевых моделей (АСМ) является применение в них расширенной логики начала и окончания выполнения работ, что позволяет в рамках единого план-графика проводить заблаговременный учет и оценку вклада различных направлений разработки, создания, модернизации, производства и сервисного обслуживания образцов ВВТ в ходе выполнения одного или нескольких программных мероприятий.

Метод GAAN предусматривает применение наиболее универсальных правил построения моделей данного класса и математического аппарата их анализа. Кроме того, данный метод также предусматривает возможность балансировки некоторых параметров моделируемых процессов на основе выработки управляющих воздействий как при разработке сетевых план-графиков, так и контроле их исполнения.

В качестве основных, позволяющих в допустимой мере упростить сложность моделирования процесса выполнения программных мероприятий, в дальнейшем рассматриваются следующие положения:

1) при моделировании исследуемого процесса не предусмотрено решение инженерных задач, связанных с выбором технических и технологических решений для достижения требуемых уровней ТТХ образцов ВВТ, а также распределения располагаемых на предприятиях ОПК материальных и трудовых ресурсов между реализуемыми работами;

2) имеется научно-методический аппарат (НМА), позволяющий проводить экспертную или статистическую оценку некоторых временных параметров выполнения составных этапов программных мероприятий;

3) сроки, порядок и этапность выполнения программных мероприятий определены и являются неизменными на момент формирования план-графика их выполнения;

4) потенциальные предприятия-исполнители программных мероприятий известны, а их возможности не изменяются на рассматриваемом программном периоде;

5) финансирование программных мероприятий будет проводится своевременно и не способствовать срыву сроков их выполнения.

В контексте рассматриваемой задачи АСМ является формой графического и математического отражения содержания, продолжительности и организационно-технологической последовательности выполнения программных мероприятий.

[6] Наиболее подробное описание метода GAAN представлено в работе [8]. Автором статьи на основе изложенных в данной работе положений сформированы прикладные аспекты их применения к рассматриваемой задаче.

В графическом плане АСМ, построенная по методу GAAN, представляет собой ориентированный граф, состоящий из двух элементов – «операция» и «событие»[7]. «Операция» определяется как какой-то процесс, требующий затрат финансовых и временных ресурсов и необходимый для выполнения работ по развитию СВТС. На план-графике «операции» изображаются в виде сплошных стрелок, указывающих последовательность их выполнения.

При необходимости АСМ выполнения программных мероприятий может включать следующие дополнительные типы «операций»:

1) «фиктивная операция», которая является отражением логической взаимосвязи между отдельными «операциями», не требующей затрат финансовых и временных ресурсов, но показывающей возможность (невозможность) начала одной «операции» от другой. На графе данный элемент изображается в виде штриховой линии;

2) «операция-ожидание», которая отражает процесс, требующий затрат времени, но не требующий затрат финансовых ресурсов. На графе данный элемент изображается в виде штрихпунктирной стрелки, указывающей направление «простоя».

Под типовыми «операциями» при формировании модели могут рассматриваться:
1) организационные работы по согласованию или утверждению проектных материалов, документации, технических решений и др. результатов интеллектуальной, производственной или строительной деятельности, осуществляемой в рамках подготовки и выполнения программных мероприятий;
2) подготовка рабочих материалов или отчетной документации по научно-исследовательским работам;
3) разработка (доработка) эскизного проекта или его составной части;
4) разработка (доработка) технического проекта или его составной части;
5) разработка (доработка) конструкторской документации или ее составной части;
6) изготовление опытных и серийных образцов ВВТ (составных частей образцов ВВТ);
7) проведение автономных, комплексных или предварительных испытаний образцов ВВТ или их составных частей на предприятиях ОПК;
8) проведение межведомственных, летных, ходовых или государственных испытаний образцов ВВТ или их составных частей на объектах их эксплуатации или на полигонах (космодромах);
9) проведение различного вида ремонта образцов ВВТ или их составных частей;
10) проведение погрузочно-разгрузочных, строительно-монтажных, пуско-наладочных и др. видов вспомогательных работ.

Степень детализации выполняемых работ во многом определяется полнотой и достоверностью располагаемых исходных данных. Однако, следует отметить, что для удобства и повышения оперативности анализа АСМ целесообразно проводить декомпозицию программных мероприятий на организационные, производственные, технологические и др. работы, выполняемые преимущественно только одним предприятием-исполнителем.

Все «операции» начинаются и заканчиваются «событиями», которые являются своего рода вехами, фиксирующими выполнение различных работ, и означают возможность начать следующие этапы мероприятия.

В отличие от моделей, построенных на основе методов PERT и GERT, в моделях типа GAAN предусмотрены более широкие возможности по логической увязке «операций», позволяющие отобразить альтернативность в направлениях создания или модернизации образца ВВТ, а также цикличность в выполнении отдельных видов работ, например, проведения различных видов испытаний образца ВВТ до момента их успешного завершения.

В математической форме АСМ задается следующими множествами:

$$\Omega_C = \{1, 2, 3, \dots, A-1, A\}, \quad (8)$$

$$\Omega_P = \{\omega_\beta\}, \beta = 1, \dots, B, \quad (9)$$

$$\omega_\beta \ \exists \ (\alpha, \alpha+1), \quad (10)$$

[7] Далее символы « » будут использоваться в тексте статьи для выделения и разграничения элементов всех описываемых сетевых моделей.

где: Ω_C - множество элементов «событие»; α – номер «события»; A - общее количество элементов «событие»; Ω_P – множество элементов «операция»; β – номер «операции»; B – общее количество элементов «операция»; $\omega_\beta \exists (\alpha, \alpha + 1)$ – признак наличия элемента «операция» между элементами «событие» под порядковыми номерами α и $\alpha + 1$.

В таблице 1 представлены типы основных «событий», которые будут использоваться в формируемой АСМ, и их графическая интерпретация.

По представленным правилам формирования сетевых план-графиков выполнения программных мероприятий может осуществляться моделирование производственных и технологических циклов создания, модернизации и ремонта единичных образцов ВВТ или их опытной (серийной) партии с учетом принятого внутри кооперации предприятий ОПК параллельного или последовательного порядка создания их составных частей, минимальных и максимальных объемов и темпов производства.

На рисунках 1 и 2 представлены условные план-графики выполнения работ по созданию образца ВВТ (для случая, когда имеется 2 альтернативных варианта его технического облика) и серийному производству образца ВВТ с учетом параллельного создания его составных частей.

Таблица 1 – Типы «событий», используемые при моделировании процесса выполнения программных мероприятий на основе метода GAAN

Выходная часть / Входная часть	Детерминированная **«И»** (при свершении «события» одновременно могут начаться одна или несколько «операций»)	Детерминированная **«ИЛИ»** (при свершении «события» могут начаться одна из нескольких «операций»)	Вероятностная **«ИСКЛЮЧАЮЩИЙ-ИЛИ»** (при свершении «события» могут начаться одна и только одна из нескольких «операций»)
Детерминированная **«И»** («событие» наступит если будут завершены все «операции», входящие в него)	«событие-I»	«событие-IV»	«событие-VII»
Детерминированная **«ИЛИ»** («событие» наступит если будет завершена одна из нескольких «операций», входящих в него)	«событие-II»	«событие-V»	«событие-VIII»
Вероятностная **«ИСКЛЮЧАЮЩИЙ-ИЛИ»** («событие» наступит если будет завершена одна и только одна из нескольких «операций», входящих в него)	«событие-III»	«событие-VI»	«событие-IX»

Примечания:

1) «событие-I», «событие-II» и «событие-III» соответствуют детерминированным неуправляемым точкам сетевого план-графика, в которых на этапе его реализации невозможно осуществить принятие решений о проведении корректировки хода выполнения программных мероприятий. «Операции», выходящие из данных «событий», на графе АСМ могут обозначаться дополнительной пометкой «PA»;

2) «событие-IV», «событие-V» и «событие-VI» соответствуют детерминированным управляемым точкам сетевого план-графика, в которых на этапе его реализации могут быть приняты решения о корректировке хода выполнения программных мероприятий. «Операции», выходящие из данных «событий», на графе АСМ могут обозначаться дополнительной пометкой «ASA»;

3) «событие-VII», «событие-VIII» и «событие-IX» соответствуют вероятностным неуправляемым точкам сетевого план-графика, в которых может начаться одна из нескольких взаимоисключающих работ с определенной вероятностью. «Операции», выходящие из данных «событий», на графе АСМ могут обозначаться дополнительной пометкой «ADA»;

4) «операции», исходящие из элементов «событие-VII», «событие-VIII» и «событие-IX», характеризуются вероятностями перехода к их выполнению, которые определяются преимущественно экспертными способами.

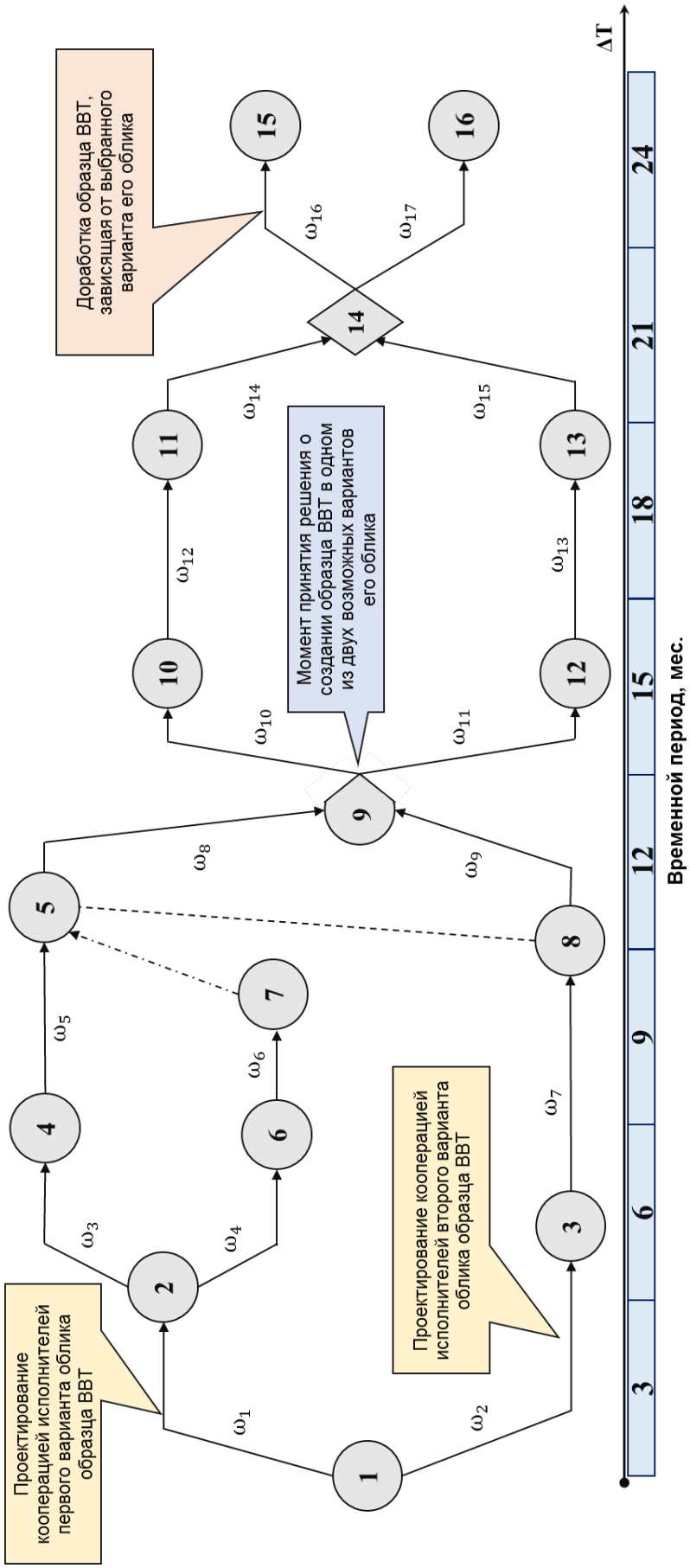

Рисунок 1 – План-график создания образца ВВТ

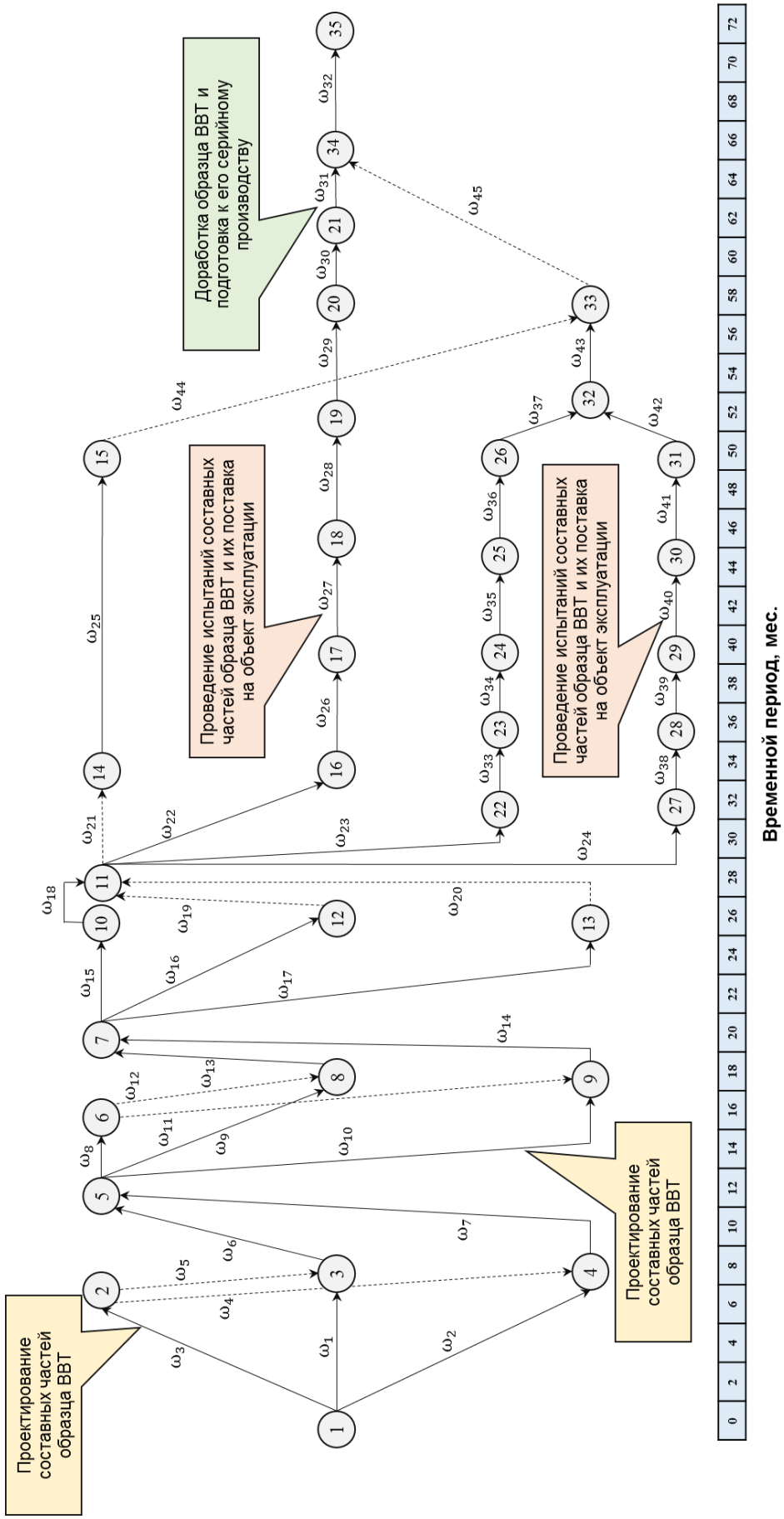

Рисунок 2 – План-график производства образца ВВТ

Анализ АСМ проводится на основе вероятностно-временных параметров «операций» или «событий», для оценки значений которых применяются практически идентичные зависимости. Однако, с точки зрения процесса управления его наиболее удобно проводить для «операций», которым поставим в соответствие следующие основные характеристики[8]:

1) плановая продолжительность «операции» $\Delta\tau_{\beta}^{У}$. Данный параметр отражает промежуток времени между свершением двух связанных «событий»;
2) оптимистичная и пессимистичная продолжительность «операции» $\Delta\tau_{\beta}^{О}$ и $\Delta\tau_{\beta}^{П}$ соответственно;
3) наиболее вероятная продолжительность «операции» $\Delta\tau_{\beta}^{В}$;
4) ожидаемая продолжительность «операции» $\Delta\tau_{\beta}^{М}$;
5) общее ожидаемое время выполнения группы «операций» $\Delta\tau_{О}^{М}$;
6) вероятность выполнения группы «операций» в установленные сроки $p_{О}^{У}$;

Определение значений параметров $\Delta\tau_{\beta}^{У}$, $\Delta\tau_{\beta}^{О}$, $\Delta\tau_{\beta}^{П}$ и $\Delta\tau_{\beta}^{В}$ может осуществляться на основе специальных методик с использованием экспертных знаний или статистических данных по результатам выполнения работ-аналогов в предшествующие программные периоды.

При проведении анализа модели на основе рассмотрения элементов типа «событие», то оцениваемыми параметрами могут являться:

1) плановое время наступления «события» $\tau_{\alpha}^{У}$;
2) оптимистичное и пессимистичное время наступления «события» $\tau_{\alpha}^{О}$ и $\tau_{\alpha}^{П}$ соответственно;
3) наиболее вероятное время наступления «события» $\tau_{\alpha}^{В}$;
4) ожидаемое время наступления «события» $\tau_{\alpha}^{М}$;
5) вероятность наступления «события» в плановый срок $p_{\alpha}^{У}$;
6) вероятность не наступления «события» в плановый срок $q_{\alpha}^{У}$ и др.

Далее представлены некоторые особенности оценки значений основных параметров АСМ выполнения программных мероприятий для элементов типа «операция».

Согласно многим источникам [10-13] при анализе сложных проектов с учетом неопределенного характера сроков и результатов их реализации принимается гипотеза о том, что время выполнения их составных этапов подчиняется бета-распределению или распределению Релея и описывается, как правило, двумя величинами – математическим ожиданием и дисперсией.

В данной статье в качестве основного будет использоваться бета-распределение, для которого определение математического ожидания и дисперсии продолжительности выполнения работ будет определяться по следующим формулам[9]:

$$\Delta\tau_{\beta}^{М} = \frac{\Delta\tau_{\beta}^{О}+\Delta\tau_{\beta}^{П}+4*\Delta\tau_{\beta}^{В}}{6}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\beta}^{2} = \left(\frac{\Delta\tau_{\beta}^{О}+\Delta\tau_{\beta}^{П}}{6}\right)^{2}. \quad (12)$$

Следует отметить, что при недостаточном количестве статистических данных по результатам выполнения аналогичных проектов (работ) допускается использование частного вида бета-распределения, который определяется двумя параметрами – $\Delta\tau_{\beta}^{О}$ и $\Delta\tau_{\beta}^{П}$.

В данном случае ожидаемое время выполнения «операции» и дисперсия будут определяться по следующим формулам:

$$\Delta\tau_{\beta}^{М} = \frac{3*\Delta\tau_{\beta}^{О}+2*\Delta\tau_{\beta}^{П}}{5}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\beta}^{2} = \left(\frac{\Delta\tau_{\beta}^{О}+\Delta\tau_{\beta}^{П}}{5}\right)^{2}. \quad (14)$$

Особенностью метода GAAN является то, что он предусматривает возможность упрощения процедуры расчета значений вероятностно-временных характеристик процесса выполнения программных мероприятий за счет преобразования топологии АСМ на основе применения положений алгебры графов С.Элмаграби [8].

---

[8] Писарук Н.Н. Исследование операций: учеб. пособие. Минск: БГУ, 2015. 304 с.
[9] *Там же.*

Суть такой процедуры заключается в минимизации количества «событий» и «операций» в АСМ и сведению ее структуры к эквивалентному виду, включающему преимущественно только «события» с входами и выходами типа «ИЛИ» и «ИСКЛЮЧАЮЩИЙ-ИЛИ».

Далее представлены некоторые правила преобразования топологии АСМ выполнения программных мероприятий, которые наиболее целесообразно применять при ее анализе.

Объединение последовательных «операций» между детерминированными и/или вероятностными «событиями» (Объединение «И»/«И», Объединение «ИЛИ»/«ИЛИ» и др.).

Преобразование некоторых временных параметров, например, последовательно выполняемых «операций» ω_1 и ω_2 проводится по следующим зависимостям:

$$\Delta\tau_1^{\text{у}\prime} = \Delta\tau_1^{\text{у}} + \Delta\tau_2^{\text{у}}, \tag{15}$$

$$\Delta\tau_1^{\text{м}\prime} = \Delta\tau_1^{\text{м}} + \Delta\tau_2^{\text{м}}, \tag{16}$$

Сокращение параллельных «операций» между только детерминированными выходными и входными частями «событий» (Сокращение «И»/«И»).

В данном случае для преобразования аналогичных параметров параллельно выполняемых «операций» ω_1 и ω_2 используются следующие зависимости:

$$\Delta\tau_1^{\text{у}\prime} = max\{\Delta\tau_1^{\text{у}}, \Delta\tau_2^{\text{у}}\}, \tag{17}$$

$$\Delta\tau_1^{\text{м}\prime} = max\{\Delta\tau_1^{\text{м}}, \Delta\tau_2^{\text{м}}\}, \tag{18}$$

Сокращение параллельных «операций» между детерминированной выходной и вероятностной входной частями «событий» (Сокращение «И»/«ИСКЛЮЧАЮЩИЙ-ИЛИ»).

Например, значение установленной продолжительности эквивалентной «операции» ω_1', сформированной при сокращении трех параллельно выполняемых «операций» ω_1, ω_2 и ω_3, будет определяться по следующей зависимости:

$$\Delta\tau_1^{\text{у}\prime} = min\{\Delta\tau_1^{\text{у}}, \Delta\tau_2^{\text{у}}, \Delta\tau_3^{\text{у}}\}. \tag{19}$$

По идентичным зависимостям могут быть вычислены и другие временные параметры составных этапов программных мероприятий, представленные ранее.

Преобразование структуры АСМ позволяет существенно упростить оценку вероятностно-временных параметров некоторой совокупности «операций», выполняемых в интересах достижения общей цели.

В соответствии с центральной предельной теоремой Ляпунова [10; 14] можно отметить, что продолжительность выполнения программных мероприятий при достаточно большом количестве их составных этапов вне зависимости от закона их распределения подчиняется нормальному закону (закону Гаусса). Исходя из этого, определение общего ожидаемого срока выполнения программного мероприятия и дисперсии может проводиться на основе известных значений аналогичных параметров эквивалентных «операций», лежащих на критическом пути [10]:

$$\Delta\tau_0^{\text{м}} = \sum_{\omega_\beta' \in S^{\text{кр}}} \Delta\tau_\beta^{\text{м}\prime}, \tag{20}$$

где $\omega_\beta' \in S^{\text{кр}}$ – условие принадлежности эквивалентной «операции» к критическому пути[10].

Для определения длины критического пути $S^{\text{кр}}$ в сетевых моделях, включающих большое количество «событий» и «операций», могут быть использованы алгоритмы Форда или Беллмана-Калаба, которые предусматривают последовательный обход «событий» в графе модели. При наличии нескольких альтернативных вариантов завершения программных мероприятий критический путь определяется для каждого завершающего «события».

При известных значениях ожидаемых и установленных сроков выполнения эквивалентных «операций», для приближенной оценки вероятности того, что общее ожидаемое время выполнения программного мероприятия не превысит установленное значение, может быть использована табулированная функция Лапласа [14]:

[10] В соответствии с [10] любая «операция» будет являться критической по отношению к общему сроку выполнения программного мероприятия, если она будет иметь нулевой резерв времени.

$$p_0^{\text{У}} = f^{\text{Л}}\left(\frac{\Delta\tau_0^{\text{У}} - \Delta\tau_0^{\text{М}}}{\sigma_0}\right), \quad (21)$$

$$q_0^{\text{У}} = 1 - f^{\text{Л}}\left(\frac{\Delta\tau_0^{\text{У}} - \Delta\tau_0^{\text{М}}}{\sigma_0}\right), \quad (22)$$

где $\Delta\tau_0^{\text{У}}$ – установленная (плановая) продолжительность выполнения программного мероприятия.

При наличии нескольких альтернативных вариантов завершения программного мероприятия значения параметров $p_0^{\text{У}}$ и $q_0^{\text{У}}$ должны определяться для каждого из них.

Использование вышеизложенных формализованных зависимостей позволяет не только оценить значения показателей реализуемости составных этапов и программных мероприятий в целом, но также спрогнозировать возможные неблагоприятные исходы их выполнения, характеризующиеся недостижением плановых значений их целевых показателей.

Особенности формирования и анализа марковской модели развития сложной военно-технической системы

В контексте рассматриваемой задачи моделирование процесса развития СВТС предлагается проводить на основе математического аппарата теории конечных марковских цепей [15; 16]. Построение сетевой модели данного типа позволит достаточно корректно провести имитацию рассматриваемого процесса и определяется тем, что:

1) развитие СВТС является случайным процессом, результаты которого зависят от множества разнородных факторов различной природы;

2) для строго заданного состава программных мероприятий может быть сформировано и рассмотрено конечное множество состояний СВТС;

3) в единичный неделимый момент времени параметры процесса развития СВТС определяются текущими (достигнутыми) результатами выполнения программных мероприятий.

С учетом вышеизложенных положений формируемая модель будет являться конечной неоднородной марковской цепью с дискретным временем и без предыстории, состоящей из двух элементов:

1) Элемент *«состояние»*, которое соответствует определенной комбинации исходов выполнения независимых программных мероприятий.

Данный элемент обозначается на графе в виде сплошного круга или квадрата и характеризуется показателем $P_a(t)$. Для всего множества «состояний» может быть сформирована вектор-строка вероятностей их возникновения в заданный момент времени:

$$\vec{\mathrm{P}}_{\{a\}}(t) = \langle P_0(t), P_1(t), P_2(t), \dots, P_A(t)\rangle. \quad (23)$$

В момент времени, предшествующий началу программного периода, данный вектор имеет следующий вид:

$$\vec{\mathrm{P}}_{\{a\}}(t=0) = \langle 1, 0, 0, 0, \dots, 0, 0\rangle. \quad (24)$$

2) Элемент *«переход»*, отражающий смену одних «состояний» на другие в динамике развития СВТС и обозначаемый на графе в виде сплошной стрелки. Нумерация «переходов» в модели не проводится.

На основе известных значений вероятностных параметров «переходов» для каждого момента времени t могут быть сформированы матрицы переходных вероятностей. Строки данной матрицы соответствуют «состоянию», из которого осуществляется «переход», а столбцы в которое оно переходит:

$$\mathrm{P}_{[a,a]}(t) = \begin{pmatrix} p_{0,0}(t) & p_{0,1}(t) & p_{0,2}(t) & \dots & p_{0,A}(t) \\ p_{1,0}(t) & p_{1,1}(t) & p_{1,2}(t) & \dots & p_{1,A}(t) \\ p_{2,0}(t) & p_{2,1}(t) & p_{2,2}(t) & \dots & p_{2,A}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{A,0}(t) & p_{A,1}(t) & p_{A,2}(t) & \dots & p_{A,A}(t) \end{pmatrix}, t \in \Delta\mathrm{T}. \quad (25)$$

Таким образом, в математическом плане модель считается заданной, если определены следующие ее атрибуты:

$$\{S_a, \vec{\mathrm{P}}_{\{a\}}(t), \mathrm{P}_{[a,a]}(t)\}, t = t^{\mathrm{H}}, \dots, t^{\mathrm{K}}. \quad (26)$$

На этапе формирования модели проводится уточнение типовых исходов выполнения программных мероприятий. Учитывая множественность и неоднородность исходов выполнения различных программных мероприятий, в целях уменьшения размерности формируемой модели и снижения вычислительной сложности ее анализа представляется целесообразным рассматривать только следующие два противоположных и взаимоисключающих результата:

1) *положительный исход* – выполнение всего запланированного объема работ, предусмотренного реализацией программного мероприятия в момент времени t. Данный исход будет характеризоваться показателем $p_i^{\mathrm{B}}(t)$;

2) *неблагоприятный исход* – срыв выполнения запланированного объема работ, предусмотренного реализацией программного мероприятия в момент времени t. Данный исход выполнения программного мероприятия характеризуется показателем $q_i^{\mathrm{B}}(t)$.

При проектировании модели также может учитываться технологическая связность и организационная последовательность выполнения программных мероприятий, что может существенно уменьшить количество анализируемых «состояний» и упростить графическую структуру модели.

Общее количество возможных «состояний» A определяется количеством рассматриваемых независимых мероприятий I (с учетом или без учета групповых позиций), входящих в состав рассматриваемой программы развития СВТС, и двумя вышеизложенными исходами их выполнения.

Для учета в модели полной группы несовместимых «состояний» на всем множестве независимых программных мероприятий в единичный момент времени добавляется дополнительное «состояние» S_0, которое соответствует всем положительным исходам выполнения мероприятий, реализуемых в соответствующий момент времени.

Таким образом, значение параметра A определяется по следующей формуле:

$$A = 2^I - 1. \quad (27)$$

Для повышения читаемости и удобства восприятия формируемой модели порядковым номерам «состояний» a комбинаторным способом могут быть поставлены в соответствие неблагоприятные исходы выполнения программных мероприятий $\mathrm{п}_i$, упорядоченные по их типам (НИР, ОКР, серийное производство, ремонт), важности (при наличии таких оценок) или срокам выполнения.

Например, при рассмотрении 5 программных мероприятий $\mathrm{п}_1, \mathrm{п}_2, \mathrm{п}_3, \mathrm{п}_4, \mathrm{п}_5$, номера которым присвоены в порядке уменьшения их важности, то «состояния», общее количество которых $A = 31$, могут характеризоваться следующими исходами, представленными в таблице 2.

В качестве основных допущений, учитываемых при формировании и анализе модели, выступают следующие положения, которые предопределяют структуру формируемой модели и являются базовыми правилами формирования «переходов» между «состояниями» и оценки их вероятностных характеристик:

- при начале реализации программы развития СВТС прекращение данного процесса невозможно;
- нарушение хода выполнения программных мероприятий может носить как краткосрочный, так и долгосрочный характер;
- при нарушении хода выполнения одного или нескольких программных мероприятий в будущий момент времени возможна стабилизация процесса развития СВТС;
- выполнение составных этапов программных мероприятий осуществляется последовательно, при этом объем работ, выполнение которого запланировано на будущий момент времени, не может быть выполнен раньше этого срока без выполнения предшествующих работ.

На рисунке 3 представлена общая графическая структура марковской модели возникновения рисковых событий при развитии СВТС.

Таблица 2 – Пример соотношения рисковых событий и исходов выполнения программных мероприятий

Собы-тия	Программные мероприятия				
	$п_1$	$п_2$	$п_3$	$п_4$	$п_5$
S_0	Положительный исход				
S_1	Неблагопр. исход	Положительный исход			
S_2	Положит. исход	Неблагопр. исход	Положительный исход		
S_3	Положительный исход		Неблагопр. исход	Положительный исход	
S_4	Положительный исход			Неблагопр. исход	Положит. исход
S_5	Положительный исход				Неблагопр. исход
S_6	Неблагоприятный исход		Положительный исход		
S_7	Неблагопр. исход	Положит. исход	Неблагопр. исход	Положительный исход	
S_8	Неблагопр. исход	Положительный исход		Неблагопр. исход	Положит. исход
…	…	…	…	…	…
S_{16}	Неблагоприятный исход			Положительный исход	
S_{17}	Неблагоприятный исход		Положит. исход	Неблагопр. исход	Положит. исход
S_{18}	Неблагоприятный исход		Положительный исход		Неблагопр. исход
S_{19}	Положит. исход	Неблагоприятный исход			Положит. исход
…	…	…	…	…	…
S_{31}	Неблагоприятный исход				

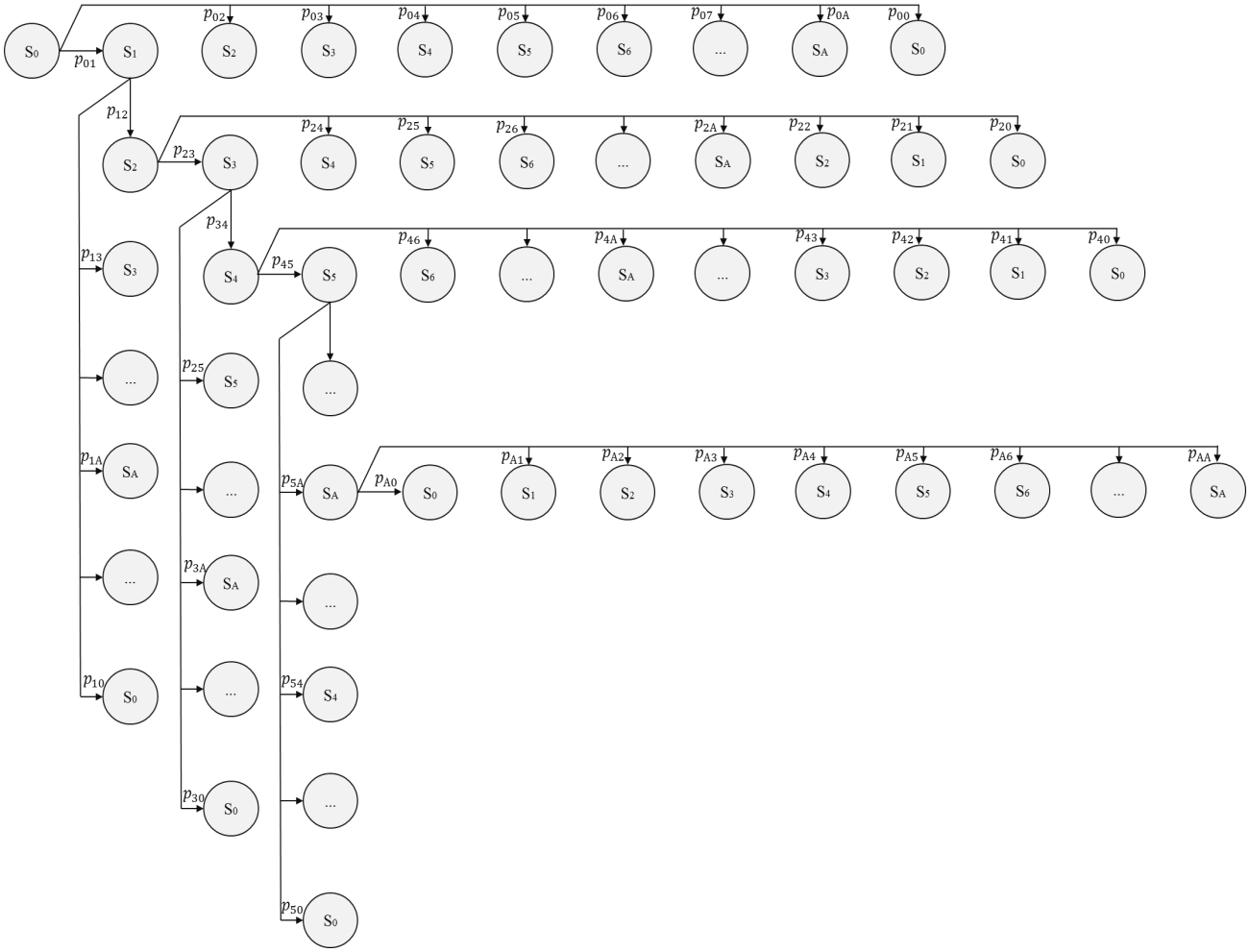

Рисунок 3 – Общая структура графа марковской модели развития СВТС

Суть этапа анализа модели заключается в оценке вероятностных параметров «состояний» сформированной модели. Для их определения можно использовать уравнение Колмогорова-Чепмена [15; 16]:

$$\vec{\mathrm{P}}_{\{a\}}(t) = \vec{\mathrm{P}}_{\{a\}}(t-1) * \mathrm{P}_{[a,a]}(t), \quad (28)$$

$$\sum_{a=1}^{A} p_{a=const,a}(t) = 1. \quad (29)$$

Далее представлены некоторые формализованные зависимости, позволяющие провести расчет вероятностных параметров «переходов» между «состояниями» на протяжении всего рассматриваемого программного периода:

1) при положительных исходах выполнения всех программных мероприятий (отсутствие смены события S_0):

$$p_{0,0}(t) = \prod_{i=1}^{I} p_i^{\mathrm{B}}(t), \quad (30)$$

2) при неблагоприятном исходе выполнения одного программного мероприятия (смена события S_0 на S_a, $a \neq 0$):

$$p_{0,a}(t) = q_{i_1}^{\mathrm{B}}(t) * \prod_{\substack{i_2=1 \\ i_2 \neq i_1}}^{I} p_{i_2}^{\mathrm{B}}(t), \quad (31)$$

где: i_1 – порядковый номер программного мероприятия, которому соответствует неблагоприятный исход его выполнения;
i_2 – порядковый номер программного мероприятия, которому соответствует положительный исход его выполнения;

3) при неблагоприятных исходах выполнения двух и более программных мероприятий (смена события S_0 на S_a, $a \neq 0$):

$$p_{0,a}(t) = \prod_{\substack{i_1=1 \\ i_1 \neq i_2}}^{I} q_{i_1}^{\mathrm{B}}(t) * \prod_{\substack{i_2=1 \\ i_2 \neq i_1}}^{I} p_{i_2}^{\mathrm{B}}(t), \quad (32)$$

4) при неблагоприятных исходах выполнения всех программных мероприятий (смена события S_0 на S_A):

$$p_{0,A}(t) = \prod_{i=1}^{I} q_i^{\mathrm{B}}(t). \quad (33)$$

При отсутствии выполнения в какой-либо момент времени i-го программного мероприятия данное мероприятие может условно учитываться при определении значений вероятностных показателей «состояний», связанных с смежными выполняемыми мероприятиями. В представленных формализованных зависимостях (30-33) вероятности своевременного выполнения отсутствующих мероприятий принимаются равными 1, а элементы вектор-строки вероятностей «состояний» и матрицы переходных вероятностей между «состояниями», непосредственно связанными с отсутствующими мероприятиями, принимаются равными 0.

Корректировка хода выполнения программных мероприятий

Данный этап проводится в интересах оптимизации процесса выполнения программных мероприятий в следующих случаях:

1) при принципиальной невозможности достижения целевых показателей программы или включаемых в нее программных мероприятий в рамках выделяемых бюджетных ассигнований или установленных сроков их выполнения;

2) при возникновении каких-либо неблагоприятных событий или ситуаций, связанных с нарушением (срывом) выполнения работ и необходимостью принятия компенсационных мер по минимизации наступившего (ожидаемого) ущерба.

Решение подобного рода оптимизационных задач осуществляется, как правило, в условиях финансовых или временных ограничений. При этом целевой функцией, подлежащей максимизации, может выступать один из рассматриваемых в данной статье показателей реализуемости программных мероприятий (2, 5).

Одним из наиболее эффективных подходов обеспечения максимума целевой функции реализуемости программных мероприятий является балансировка их номенклатурных, стоимостных, временных, количественных или качественных параметров, которая может проводиться с использованием алгоритмов линейного и параметрического программирования [17; 18], наиболее популярными из которых являются алгоритмы Келли, Фалкерсона, Франк-Вульфа, Гомори и др.

В тоже время, как показывает практика, в структурном плане сетевые модели выполнения программных мероприятий обладают высокой сложностью[11], а возможное наличие в них альтернативных завершающих «событий» способно привести к существенному возрастанию трудоёмкости проводимой оптимизации с применением стандартных алгоритмов на каждом последующем шаге, что в конечном итоге может свестись к невозможности решения данной задачи без применения специальных вычислительных средств и программ.

Кроме того, учитывая современные военно-политические и экономические условия строительства ВС РФ, особый интерес при обосновании программ развития различных СВТС представляет проведение балансировки параметров выполнения мероприятий не только для повышения вероятности их успешного выполнения, но также и для снижения дисбалансов, вызванных действием разнородных дестабилизирующих факторов различной природы.

В данном случае возможно оперирование понятием *«риска»*, которое в широком (концептуальном) смысле может определяться как категория, характеризующая неопределённость и(или) негативные последствия воздействия дестабилизирующих факторов на ход выполнения программных мероприятий. В работах [19-22] приведено подробное описание разработанных прикладных методов и подходов к снижению величины финансового, военно-технического и др. видов риска, сопутствующих процессу развития СВТС, путем выбора рационального состава соответствующей программы или балансировки параметров мероприятий из ее состава, которая может проводиться в т.ч. и на основе сформированных сетевых моделей.

Таким образом, в данной статье раскрыты особенности оценки реализуемости программных мероприятий развития СВТС на основе стохастических сетевых методов, комбинированное применение которых в рамках изложенного подхода обеспечивает априорную оценку агрегированных значений вероятностно-временных характеристик исследуемого процесса не только с учетом неопределенности исходов выполнения программных мероприятий, но также и многовариантности их структуры, состава и последовательности выполнения в рамках единой программы.

Список источников

1. Буренок В.М., Ляпунов В.М., Мудров В.И. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения. Изд. 2-е испр. и доп. М.: Граница, 2005. 519 с.
2. Стратегическое ракетное вооружение. Методология, опыт, проблемы. Кн.1. М.: 4 ЦНИИ Минобороны России, 2003. 640 с.
3. Михайлов С.В., Бабкин А.В., Михайлов В.В. Методологические основы формирования и выполнения гособоронзаказа в современных условиях // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2023. №3. С. 81-86.
4. Чернышева Г.Н., Рогов Н.В., Ткачева В.М. Подходы к обеспечению надежности выполнения гособоронзаказа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2021. №3. С. 94-108.
5. Буренок В.М., Косенко А.А., Лавринов Г.А. Техническое оснащение Вооруженных Сил Российской Федерации: организационные, экономические и методологические аспекты. М.: Граница, 2008. 728 с.

[11] В соответствии с [23] структурная сложность план-графика выполнения работ может определяться из соотношения общего количества элементов «операция» к количеству элементов «событие».

6. Фиров Н.В., Сорокин С.А. Методические положения оценки научно-технического риска и финансовых потерь при проведении опытно-конструкторской работы по разработке сложной технической системы // Экономический анализ: теория и практика. 2021. №10(517). С. 1933-1950.
7. Фиров Н.В., Сорокин С.А. Методические положения оценки вероятности выполнения опытно-конструкторской работы в условиях финансовых ограничений // Вопросы региональной экономики. 2021. №1(46). С. 207-214.
8. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: монография. Воронеж: Научная книга, 2010. 283 с.
9. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 416 с.
10. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций: монография. М.: Мир, 1971. 536 с.
11. Дубовский В.А., Курбанов А.Х., Плотников В.А. Сетевая модель планирования и управления процессами жизненного цикла ВВТ: процедура построения и реализации // Известия РАРАН. 2020. №3(113). С. 39-45.
12. Горевич Б.Н. Применение стохастических сетевых графов для планирования комплекса работ в условиях неопределенности // Вооружение и экономика. 2014. № 4(29). С. 27-35.
13. Еланцев Г.А. Применение программного средства Arena для имитационного моделирования стохастических сетевых графов // Вооружение и экономика. 2015. № 4(33). С. 48-54.
14. Четыркин Е.М., Калихманов И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 320 с.
15. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.
16. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники. М.: Граница, 2015. 304 с.
17. Таха Х. Введение в исследование операций. 7-е изд. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
18. Сафронов В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
19. Мунтяну А.А. Метод снижения риска при планировании развития системы стратегических ракетных вооружений // Вооружение и экономика. 2024. № 2(68). С. 57-71.
20. Лавринов Г.А., Козин М.Н. Управление рисками в системе государственного оборонного заказа. Саратов: Научная книга, 2010. 255 с.
21. Подольский А.Г., Косенко А.А. Методические подходы к снижению рисков, сопутствующих реализации мероприятий по созданию продукции военного назначения // Вооружение и экономика. 2012. №3(19). С. 56-72.
22. Боев С.Ф., Линкевичиус А.П., Логовский А.С., Рахманов А.А., Тимошенко А.В. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения. М.: Научная книга, 2019. 424 с.
23. Кармах А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования и их применение. М.: Прогресс, 1968. 183 с.

Информация об авторе

А.А. Мунтяну – кандидат технических наук, SPIN код автора 4372-5617.