

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ / RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS

DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-8-20

УДК 519.876, 621.396

Применение сетевой модели на основе многовариантных графов с динамической структурой для формирования планов- графиков создания радиолокационных станций дальнего обнаружения

**С. Ф. Боев¹, А. С. Логовский², А. М. Казанцев², А. В. Ивойлова^{2, 3},
А. В. Тимошенко², П. Н. Тришкин²**

¹ ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), Москва, Россия

² АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», Москва, Россия

³ ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Процесс создания современных радиолокационных станций дальнего обнаружения (РЛС ДО) характеризуется минимизацией стоимости и времени проведения работ при необходимости снижения рисков, связанных с применением новых технических решений. В статье рассмотрен вариант типового представления сетевого плана-графика создания РЛС ДО. Отмечено, что составленный таким образом план-график является некоторым приближением к реально выполняемым работам, в результате чего необходимые проектные решения по корректировке процесса создания РЛС ДО принимаются с опозданием. Применение сетевой модели предложено для эффективного управления процессом создания РЛС ДО и формирования сетевых планов-графиков как отдельных этапов, так и всего проекта в целом. На основе анализа унифицированного ряда радиолокационных станций дальнего обнаружения отмечено, что сетевая модель для снижения рисков создания РЛС ДО должна учитывать как многовариантность выполнения решаемых задач, так и неопределенности параметров выполняемых работ. Рассмотрены основные особенности предложенной модели. В качестве примера показано применение предложенной сетевой модели при проектировании радара для комплексного исследования атмосферы. В ходе исследований было рассмотрено несколько вариантов реализации радара и выбран оптимальный по предложенным критериям.

Ключевые слова: радиолокационная станция дальнего обнаружения, сетевая модель, сетевой план-график, неопределенность, оптимальный вариант, НР-МСТ

Для цитирования:

Применение сетевой модели на основе многовариантных графов с динамической структурой для формирования планов-графиков создания радиолокационных станций дальнего обнаружения / С. Ф. Боев, А. С. Логовский, А. М. Казанцев, А. В. Ивойлова, А. В. Тимошенко, П. Н. Тришкин // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 3. С. 8–20. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-8-20

© Боев С. Ф., Логовский А. С., Казанцев А. М., Ивойлова А. В., Тимошенко А. В., Тришкин П. Н., 2020



Application of a network model based on multivariate graphs with a dynamic structure for generating network schedules for the creation of early warning radar stations

S. F. Boev¹, A. S. Logovsky², A. M. Kazantsev², A. V. Ivoylova^{2, 3},
A. V. Timoshenko², P. N. Trishkin²

¹ Vympel PJSC, Moscow, Russia

² Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute, Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

The process of creating modern early warning radar stations is characterized by minimizing the cost and time of work at the same time by reducing the risks associated with the use of new technical solutions. The article considers a variant of a typical representation of a network schedule for creating an early warning radar stations. It is noted that the schedule drawn up in this way is some approximation to the actual work being performed, as a result of which the necessary design decisions to adjust the process of creating early warning radar stations are taken late. The use of a network model is proposed for effective management of the radar creation process and the formation of network schedules for both individual stages and the entire project as a whole. Based on the analysis of a unified range of early warning radar stations, it is noted that the network model for reducing the risks of creating a radar should take into account both the multivariate of the tasks to be solved and the uncertainty of the parameters of the work performed. The main features of the proposed model are considered. The implementation of the proposed network model in the design of radar design for complex atmospheric research is shown as an example. During the research, several variants of radar implementation were considered and the optimal one was selected according to the proposed criteria.

Key words: early warning radar, network model, network schedule, uncertainty, the best option, IS-MST

For citation:

Boev S. F., Logovsky A. S., Kazantsev A. M., Ivoylova A. V., Timoshenko A. V., Trishkin P. N. Application of a network model based on multivariate graphs with a dynamic structure for generating network schedules for the creation of early warning radar stations. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 3, pp. 8–20. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-30-3-8-20

Введение

Современные радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО) являются многофункциональными информационными средствами, способными решать задачи оценки обстановки в зоне ответственности и представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы функционально-блочной структуры. В процессе их создания применяется весь спектр инновационных технологий и технических решений, воплощающих современные достижения в области информационных технологий радиоэлектронных систем.

Ключевым моментом при создании новых РЛС ДО является требование одновременного решения таких противоречивых задач, как необходимость сокращения стоимости и сроков изделия при количественном и/или качественном улучшении тактико-технических характеристик по сравнению с ранее созданными образцами. Это обуславливает необходимость поиска и использования новых технических и конструктивных решений, применение

которых увеличивает риски своевременной и качественной разработки РЛС [1].

Постановка задачи

В настоящее время процесс создания радиолокационных станций дальнего обнаружения регламентируется ГОСТ и нормативными документами, на основе которых составляется единый сквозной план создания РЛС ДО изделия, в том числе план-график выполнения опытно-конструкторских работ. Форма и содержание данных документов строго определены ГОСТ и в основном представляют собой таблицу с данными по проекту. Однако на практике используется более удобная форма представления плана-графика работ в виде перечня и последовательности задач и взаимосвязи между ними – диаграмма Ганта.

Необходимо также отметить, что процесс проектирования и создания РЛС ДО сопряжен с разного рода неопределенностями, которые являются причиной возникновения рисков. Под

неопределенностью будем понимать неполноту и неточность информации о процессе создания РЛС ДО, в т. ч. по параметрам разработки инновационных технических решений, наличие субъективных экспертных оценок при принятии решений [2]. Основными причинами появления в процессе создания РЛС ДО неопределенности могут быть:

- наличие различных потенциальных вариантов реализации одного и того же процесса, при этом выбор одного из вариантов по ряду причин не может быть сделан на начальных этапах проектирования системы;
- различные погрешности, ошибки при расчетах и др.;
- плохо формализуемые действия человека, участвующего в контуре управления, и субъективность его действий при принятии решений;
- нечеткость полученной у специалистов информации, описывающей состояние объекта.

Таким образом, составленный с учетом вышеуказанных неопределенностей план-график не всегда соответствует реально выполняемым работам.

Практика создания радиолокационных станций дальнего обнаружения показала, что к числу наиболее существенных недостатков типовых представлений плана создания РЛС ДО в виде диаграммы Ганта в условиях неопределенностей следует отнести следующие:

- статичность: диаграмма не отражает динамики процесса и требует его постоянного мониторинга и контроля,
- контрольные точки (вехи) плана, как и другие границы, являются детерминированными календарными датами, что не позволяет количественно определить, насколько сдвиг одной контрольной точки приводит к сдвигу всего проекта.

При этом управление созданием РЛС ДО сводится к мониторингу текущего состояния проекта [3]. В результате необходимые проектные решения по корректировке процесса создания РЛС

ДО принимаются с опозданием, что может привести к срыву сроков выполнения как этапа, так и всего проекта по созданию изделия. В результате данные обстоятельства приводят к необходимости совершенствования существующего научно-методического аппарата планирования и управления процессом разработки РЛС ДО.

Сетевая модель создания РЛС ДО

С точки зрения теории организации планирования и управления процессами создания сложных технических систем, требующими комплексирования большого числа разнородных и разноплановых работ, наиболее близкими к задаче создания РЛС ДО являются методы сетевого планирования [4]. На рис. 1 в обобщенной форме показаны основные этапы сетевого планирования – структурное планирование и календарное (временное) планирование [5]. На первом этапе определяются отдельные процессы, составляющие процесс создания сложной системы, их последовательность и длительность. Далее проект представляется в виде графа и на его основе выполняются вычисления, в результате которых составляется временной график реализации проекта.

Ключевым звеном при таком подходе к организации планирования и управления созданием сложной технической системы является построение сетевой модели. Под сетевой моделью будем понимать экономико-математическую модель, отражающую весь комплекс работ и событий, связанных с созданием РЛС ДО в их логической и технологической последовательности [6]. Сетевая модель позволяет проводить оценку процессов создания сложных систем и вносить корректировки в структуру проекта еще до момента его реализации. Более того, она играет огромную роль при разработке календарного плана выполнения процесса создания сложной системы [7], который может быть представлен как в виде таблицы, так и более наглядно в виде диаграммы Ганта или диаграммы контрольных событий.

Таким образом, можно сделать вывод, что для эффективного управления созданием радиолокаци-

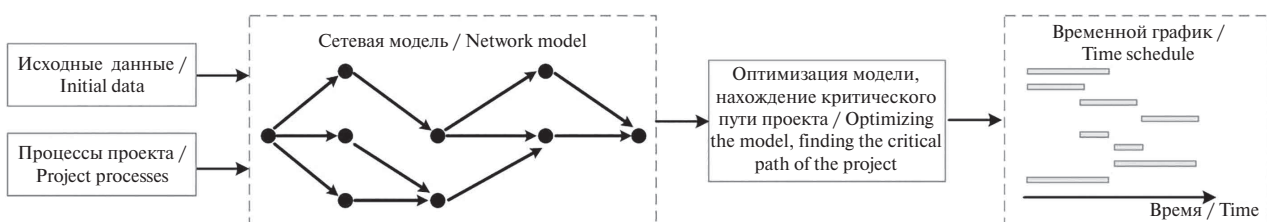


Рисунок 1. Основные этапы сетевого планирования
Figure 1. Key steps in network planning

онных станций дальнего обнаружения и формирования календарных планов-графиков как отдельных этапов, так и всего проекта в целом требуется разработка сетевой модели создания РЛС ДО.

Анализ проектов по созданию радиолокационных станций дальнего обнаружения на протяжении последних лет позволил определить перечень факторов, которые должны учитываться при разработке сетевой модели создания РЛС ДО:

1. Работы в сетевой модели оцениваются на основе экспертных оценок и аналогичных ранее выполнявшихся работ. При этом параметры работ характеризуются интервальными значениями в виде $w = [w_{\min}, w_{\max}]$.
2. Возможны различные варианты выполнения определенной работы или целого технологического процесса, которые известны заранее.

Кроме того, в процессе создания РЛС ДО возможны случаи отказа от планируемых решений:

- в связи с недостижимостью требуемых проектом характеристик;
- в связи со значительными превышениями сроков и стоимости проекта;
- в связи с технологическими или другими ограничениями.

Решением может стать как изменение технологической цепочки и выбор варианта реализации проекта из возможных альтернатив, так и появление новых решений (работ).

Данные обстоятельства приводят к тому, что сетевая модель создания РЛС ДО должна учитывать достоинства как альтернативных сетевых моделей, позволяющих описывать многовариантные процессы создания сложных технических систем [8], так и динамических графов, учитывающих возможные изменения сетевой модели [9, 10].

В результате сетевая модель создания радиолокационных станций дальнего обнаружения с учетом возможных вариантов неопределенностей процесса разработки станции, а также того, что каждая РЛС ДО – это уникальный образец, создаваемый в единственном экземпляре, может быть представлена в следующем виде.

Сетевая модель создания РЛС ДО представляет собой конечный связанный ориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ – множество вершин графа; $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – множество дуг графа, соединяющих вершины v_i и v_j между собой ($i, j = 1, \dots, n$, где n – количество вершин графа G), причем $V \cap E = \emptyset$. Множеству вершин V сопоставляется множество событий по созданию радиолокационных станций дальнего обнаружения, например, изготовление

экспериментального образца компонента РЛС ДО с определенными техническими характеристиками. Множеству дуг E сопоставляется множество работ, характеризующих процесс выполнения РЛС ДО.

Основными свойствами модели являются [8]:

1. Множество вершин V графа G неоднородно и в зависимости от вида работ, предусмотренных в процессе выполнения этапа создания РЛС ДО, может состоять из вершин типа «И-И», так и сложных логических типов «И-исключающее ИЛИ», «исключающее ИЛИ-И» и «исключающее ИЛИ-исключающее ИЛИ».
2. Множество дуг E графа G разбивается на два подмножества:
 - подмножество дуг E' , соответствующих действительным работам по созданию РЛС ДО;
 - подмножество дуг E'' , отражающих логические операции и соответствующих фиктивным работам.
3. Содержательная информация, характеризующая переход от одного события графа G к другому, задается следующим образом: каждой дуге $e \in E'$ графа G , отражающей действительную работу, приписывается вектор W величин, отражающих следующие показатели комплекса работ по созданию РЛС ДО:
 - время выполнения работы T ;
 - требуемые финансовые затраты на выполнение работы C ;
 - трудоемкость выполнения работы τ ;
 - коэффициент готовности работы K , характеризующий степень соответствия текущих конструкторско-технических параметров разрабатываемой аппаратуры требованиям к ней.
 Компоненты данного вектора w_i ($i = 1, \dots, 4$) для нивелирования неопределенности исходных данных представлены недетерминированными оценками в виде интервальных чисел, т. е.:
 - время выполнения работы $T = [T_{\min}, T_{\max}]$;
 - требуемые финансовые затраты на выполнение работы $C = [C_{\min}, C_{\max}]$;
 - количество персонала, необходимого для выполнения работы $N = [N_{\min}, N_{\max}]$;
 - коэффициент готовности работы $K = [K_{\min}, K_{\max}]$, $K \in [0; 1]$;
4. Структура сетевой модели подразумевает наличие только детерминированных точек ветвления, т. е. комплексы работ графа $G(V, E)$, составляющие отдельные детерминированные фрагменты $G_{ij}(V_{ij}, E_{ij})$, полностью определены по составу и структуре составляющих его операций.
5. Оценка осуществимости P_i отдельной работы или локального варианта сетевой модели P_{ij} осуществляется на основе критерия риска R ,

т.е. каждой работе и каждому альтернативному пути, исходящему из вершины i и ведущему к конечной вершине j , отнесено неотрицательное число $P_{ij} = 1 - R_{ij}$, $P_{ij} \leq 1$ (для случая отдельной работы $P_i = 1 - R_i$), такое, что $\sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} = 1$, где n_i – число локальных вариантов, возникающих в событии i . В качестве риска R в соответствии с [1] рассматривается вероятность того, что отдельная работа или их последовательность не будет выполнена к заданному моменту времени. Риск R выполнения работы в таком случае будем равен

$$R(t) = e^{-\lambda(T+K-t_a)}, \quad (1)$$

где λ – частота наступления событий, связанных с нарушением плана-графика выполнения работ, T – планируемая продолжительность выполнения работы, t_a – время выполнения аналогичной работы (при наличии).

6. Когда локальные альтернативные варианты сетевой модели не обеспечивают достижение целей выполнения этапа работ по созданию РЛС ДО, в сетевую модель на основе правил динамических графов [9, 10]:

- в вершине v_i графа G , имеющей сложный логический тип, по имеющейся у главного конструктора или ответственного за этап информации может быть добавлен новый локальный вариант;
- в случае, если необходимо объединить часть работ, которые в сетевой модели представляют собой последовательность вершин v_i графа G , может быть проведена операция стягивания ребер между данными работами;
- в случае, если необходимо заменить какую-либо из работ на некоторое количество ($n \geq 2$) новых работ, может быть проведена операция расщепления вершины.

На основе сетевой модели главному конструктору РЛС ДО необходимо выбрать такое решение, которое удовлетворяет векторно-целевой функции (ВЦФ)

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)) \quad (2)$$

со следующими частными критериям:

$$\begin{aligned} F_1(x) &= \sum_{e \in E_x} T \xrightarrow{x} \min \\ F_2(x) &= \sum_{e \in E_x} C \xrightarrow{x} \min \\ F_3(x) &= \sum_{e \in E_x} \tau \xrightarrow{x} \min \\ F_4(x) &= \prod_{i=1}^n (1 - K_i) \xrightarrow{x} \min \end{aligned} \quad (3)$$

Дополнительные строгие ограничения, накладываемые при создании РЛС ДО – не превышение заданного заказчиком общего времени создания и стоимости изделия: $T \leq T_{\text{зад}}$ и $C \leq C_{\text{зад}}$.

Такое описание сетевой модели позволяет:

- учесть различного рода неопределенности, связанные с неточностью исходных данных, наличием субъективных экспертных оценок при определении параметров этапов создания РЛС ДО, а также многовариантность самого процесса создания станции;
- выбрать оптимальную последовательность событий и работ для реализации задачи создания радиолокационных станций дальнего обнаружения с учетом заданных требований и ограничений, которая в дальнейшем ляжет в основу сетевого графика создания РЛС ДО.

Результаты экспериментальных исследований

Применение разработанной сетевой модели покажем на примере проектирования радара для комплексного исследования атмосферы. Основной задачей радара НР-МСТ является исследование структуры и динамики нейтральной атмосферы и ионосферы, а также взаимодействий между ними [11]. Кроме того, радар НР-МСТ предназначен:

- для исследования глобальных процессов в атмосфере (например, отклика атмосферы на геомагнитные бури) для предупреждения их природных и техногенных последствий;
- для исследования состояния атмосферы при воздействии на нее электромагнитными излучениями разных длин волн (в составе комплекса научных инструментов);
- для исследования активности Солнца и его влияния на процессы, происходящие в атмосфере и на Земле, для сохранения здоровья людей;
- для исследования космических объектов – созвездий, астероидов и т.д.
- для исследования атмосферы Земли, в том числе в составе отечественных и зарубежных комплексов научных инструментов;
- для сопровождения пилотируемых в космос, спускаемых на Землю, находящихся на орбитах спутников;
- для проведения фундаментальных научных исследований.

Вышеуказанные задачи, в отличие от уже решаемых в процессе эксплуатации РЛС ДО, требуют разработки новых технических решений, изменения и совершенствования алгоритмов обработки радиолокационной информации, что, в свою очередь, приводит к повышению рисков создания НР-МСТ.

Для достижения поставленной задачи – создания радара НР-МСТ с учетом финансовых и временных ограничений и особенностей решаемых задач – рассматривалось три варианта реализации радара. Основные технические характеристики (ТХ) рассматриваемых вариантов представлены в табл. 1.

Каждый вариант характеризуется:

- длительностью реализации,
- стоимостью реализации,
- имеющимся техническим и технологическим заделами,
- предпочтительностью для обеспечения ТХ.

Выбор оптимального варианта реализации радара НР-МСТ осуществлялся при помощи сетевой модели, формализованной в виде ориентированного графа, показанного на рис. 2. Отдельные работы или технические решения, которые различаются для каждого из рассматриваемых вариантов, на графе размещены между логическими вершинами «И-исключающее ИЛИ» и «исключающее ИЛИ-И».

Каждая дуга графа взвешена, помимо стоимости (C) и времени реализации (T), такими параметрами, как трудоемкость выполнения работы (τ) и коэффициент готовности (K). Кроме данных параметров каждая дуга характеризуется такой оценкой, как осуществимость (P) работы. Векторно-целевая функция имеет вид в соответствии с формулой (3).

Для решения поставленной задачи были проведены следующие операции:

1. Сведение интервальных значений параметров работ к детерминированным значениям.
2. Полученные на базе экспертных оценок параметры работ каждого из имеющихся вариантов

реализации радара НР-МСТ в виде интервальных значений были преобразованы в детерминированный вид в соответствии с [12]:

$$w^* = \lambda_1 w_{\min} + \lambda_2 w_{\max}, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты важности границ интервала, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$. Если границы интервала являются равнозначными, то $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$.

Принимая во внимание особенности процесса создания радара НР-МСТ и тот факт, что созданные за последние несколько лет станции образуют унифицированный ряд, коэффициенты важности границ интервала выполняемой работы определялись с учетом:

- степени значимости работы в рамках выполняемого этапа создания НР-МСТ;
 - аналогичных успешно выполненных ранее работ в других проектах,
 - а также того факта, что каждый параметр работы должен иметь некоторый запас, например, времени для сокращения длительности работы и т. д.
3. Формирование допустимых планов реализации. На основе сетевой модели в соответствии с [8] были получены допустимые планы реализации каждого конкретного варианта (рис. 3.1–3.3). Допустимый план представляет собой перечень вершин (событий) на графе и выходящих из них дуг, однозначно определяющих варианты создания НР-МСТ, построенные при различных предположениях о составе и принципах реализации изделия.
 4. Оценка вариантов реализации радара НР-МСТ. На основе имеющихся данных и с учетом критериев ВЦФ (2–3) были получены следующие оценки вариантов реализации радара НР-МСТ.
 5. Выбор варианта реализации радара НР-МСТ.

Таблица 1. Основные характеристики вариантов радара НР-МСТ

Table 1. Main characteristics of the IS-MST radar options

Основные технические характеристики / Basic specs	НР-МСТ вариант 1 / IS-MST option 1	НР-МСТ вариант 2 / IS-MST option 2	НР-МСТ вариант 3 / IS-MST option 3
Импульсная мощность излучения, МВт / Pulsed radiation power, MW	1,4	2,1	3,9
Средняя мощность излучения, МВт / Average radiation power, MW	0,47	0,7	1,3
Энергопотребление, МВт / Power consumption, MW	4	5,9	7,5
Энергопотребление, МВА / Power consumption, MVA	5	7,3	9,4
Система охлаждения / Cooling system	Воздушная, жидкостная / Air, liquid	Воздушная, жидкостная / Air, liquid	Жидкостная / Liquid

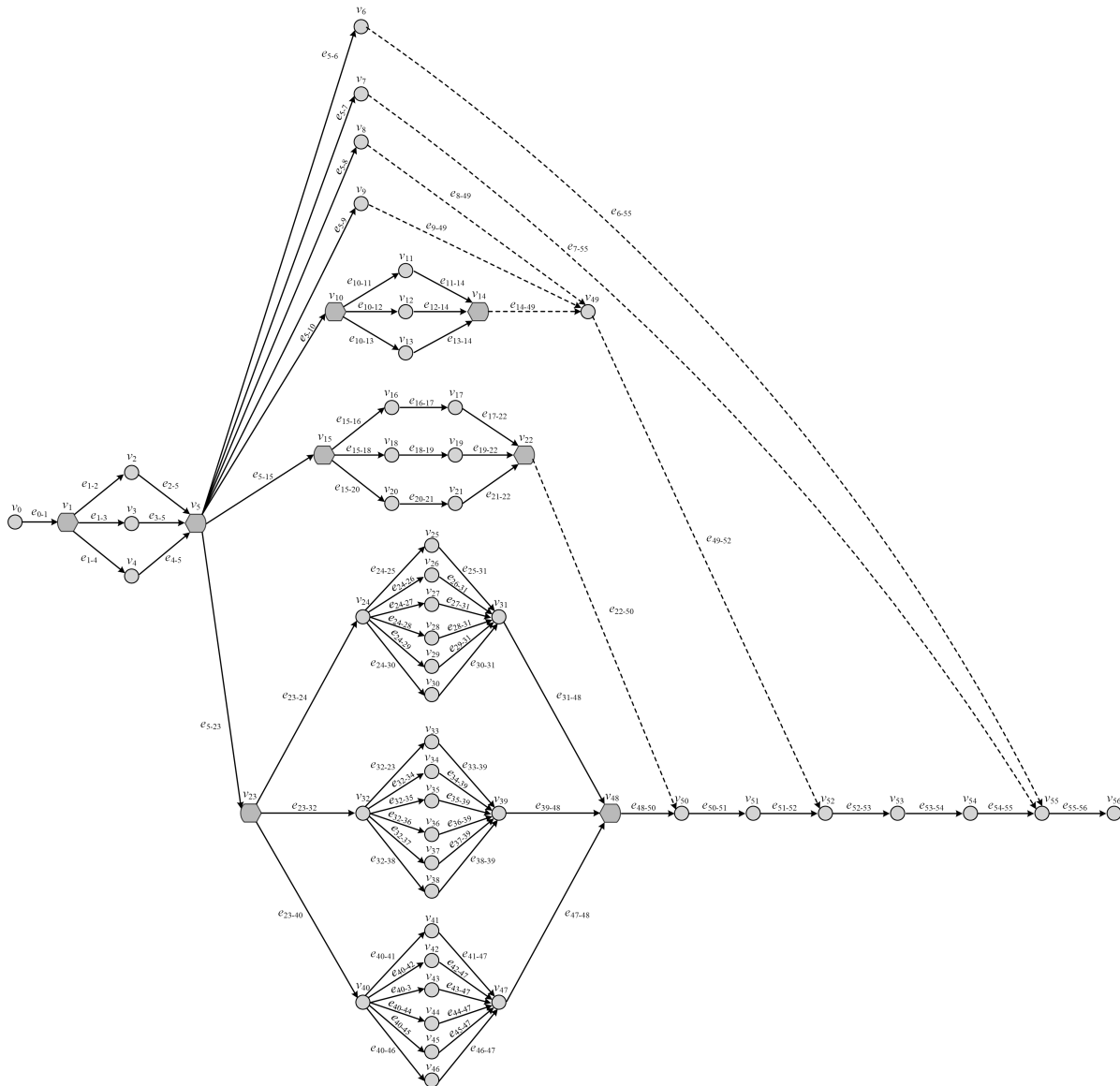


Рисунок 2. Многовариантная сетевая модель создания радара ИР-МСТ
Figure 2. Multivariate network model of creating the IS-MST radar

Произведенные расчеты позволяют главному конструктору произвести обоснованный выбор варианта реализации радара ИР-МСТ. В качестве критериев выбора были использованы следующие (в порядке убывания значимости): обеспечение тактико-технических характеристик; степень отработанности варианта, сроки и стоимость реализации. Причем приоритетным считался вариант, который обеспечивал наибольшую излучаемую мощность с учетом ограничения: чем больше потребляемая мощность, тем выше стоимость.

На момент принятия решения (начало 2020 г.) в качестве основного варианта был выбран № 3, так как:

- обеспечиваются лучшие ТХ по сравнению с другими вариантами;
- основные технические решения реализованы в макетном исполнении, что позволяет говорить о его реализуемости;
- стоимость изготовления данного варианта выше, чем варианта № 1, но при этом ТХ лучше почти на 300.

На его основе была разработана более детальная сетевая модель создания радара ИР-МСТ (рис. 4) и построен сетевой план-график (рис. 5).

Выводы

Создание современных РЛС ДО сопряжено с решением противоречивой задачи – необходимостью

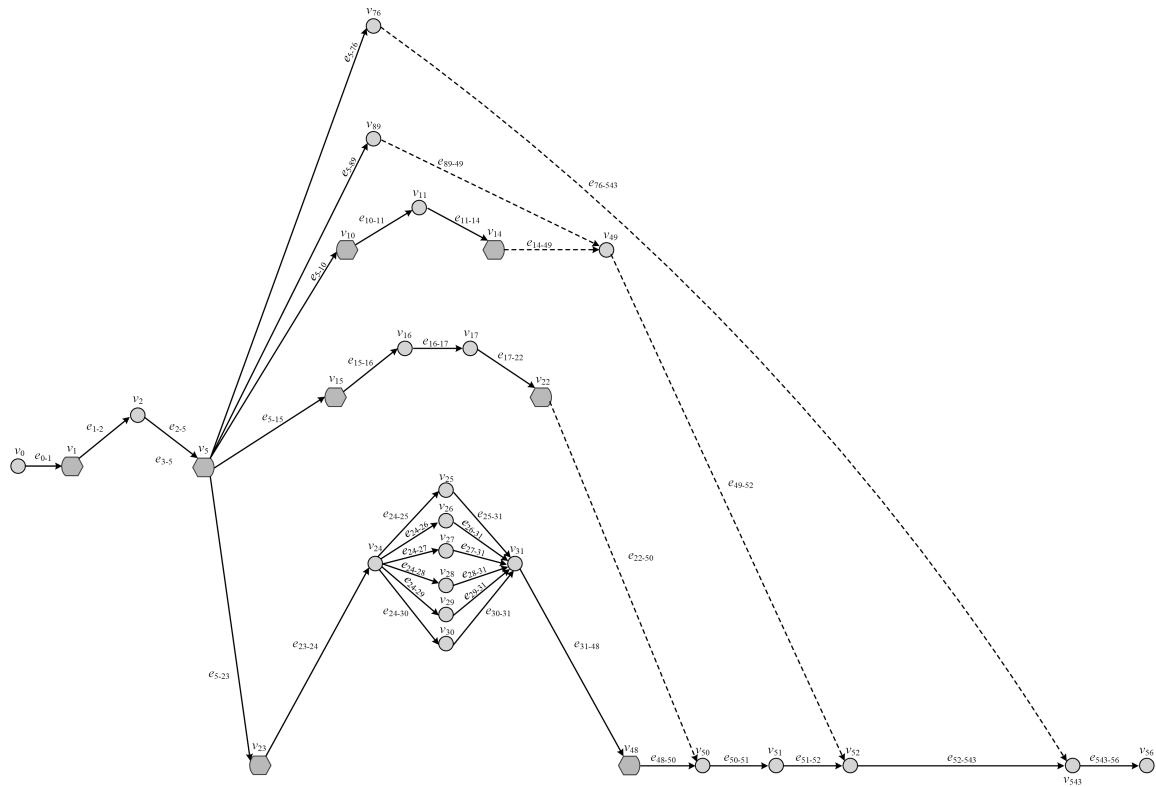


Рисунок 3.1. Допустимые планы создания радара ИР-МСТ. Вариант № 1
 Figure 3.1. Admissible plans for the creation of the IS-MST radar. Option number 1

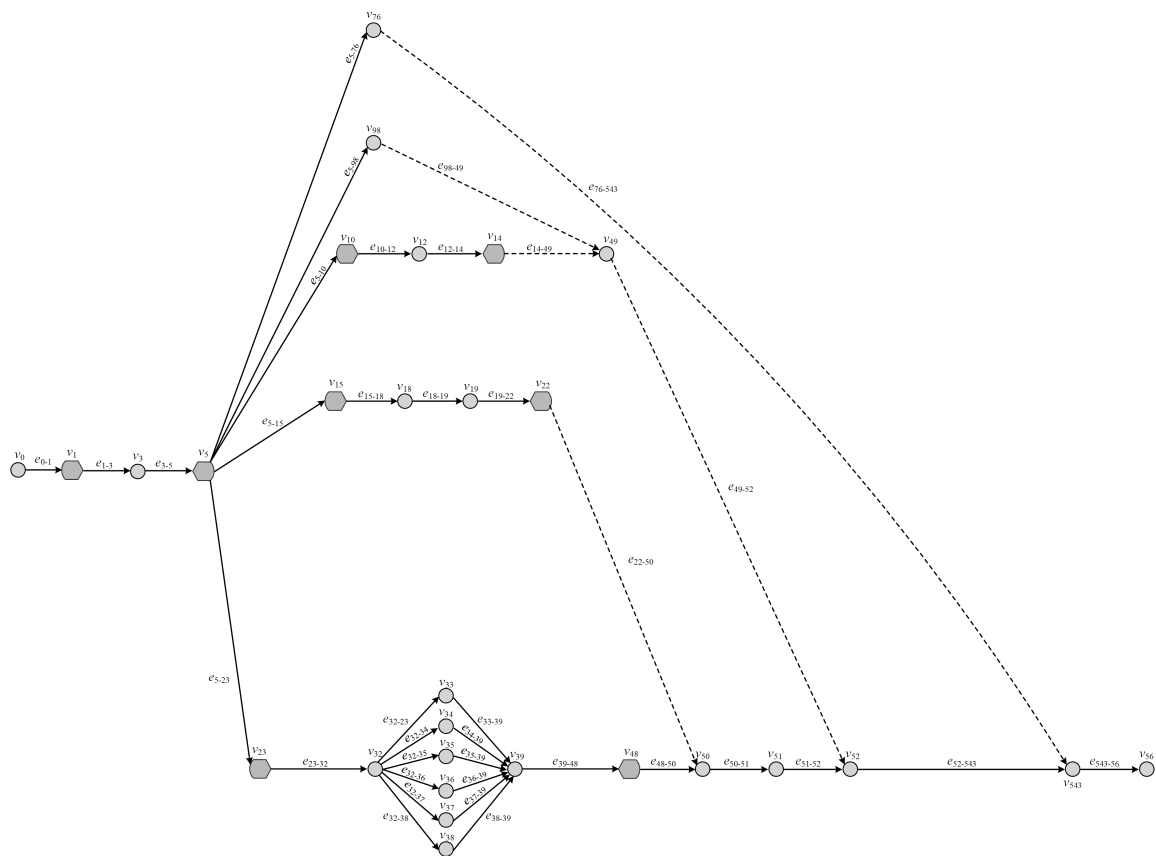


Рисунок 3.2. Допустимые планы создания радара ИР-МСТ. Вариант № 2
 Figure 3.2. Admissible plans for the creation of the IS-MST radar. Option number 2

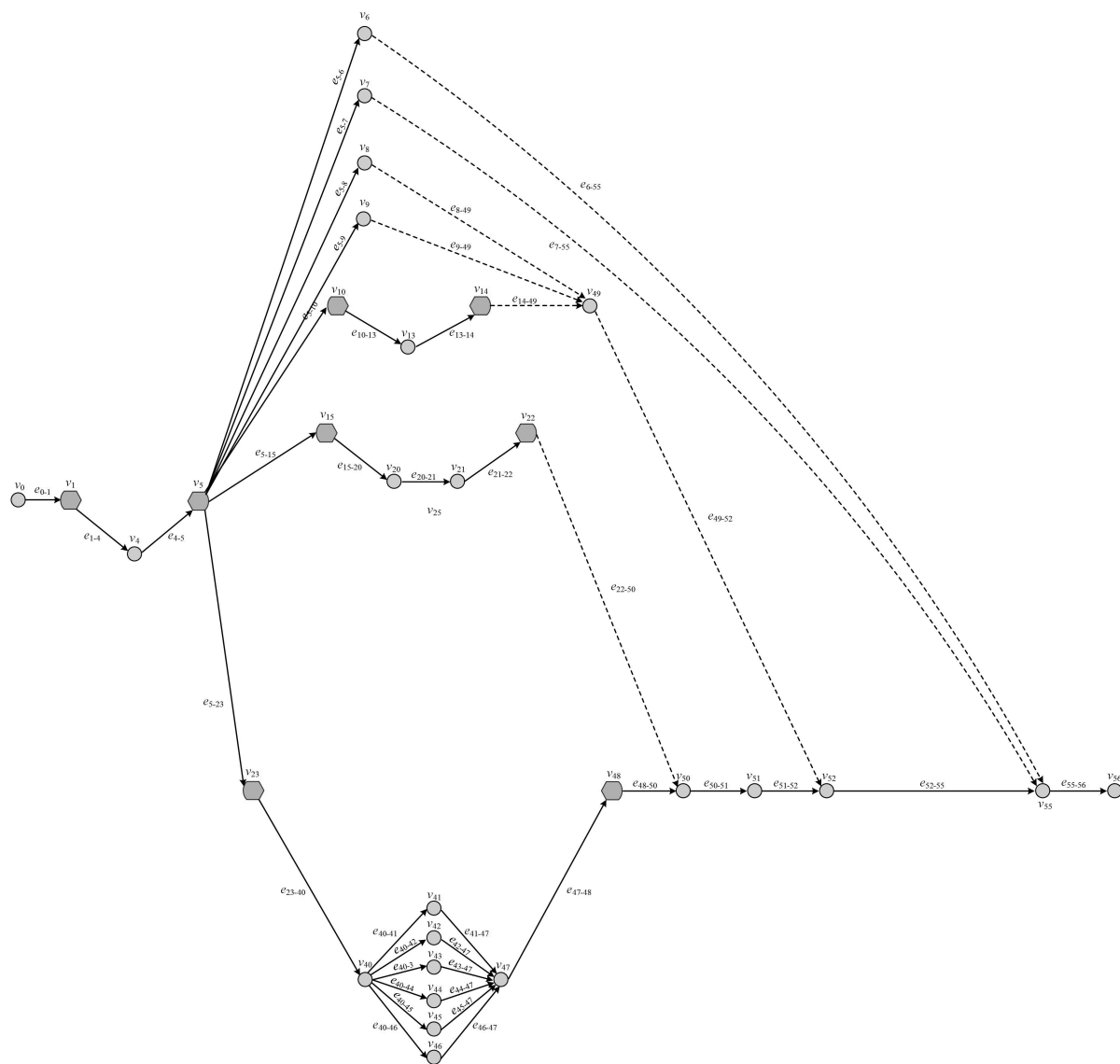


Рисунок 3.3. Допустимые планы создания радара HP-МСТ. Вариант № 3
 Figure 3.3. Admissible plans for the creation of the IS-MST radar. Option number 3

Таблица 2. Оценка вариантов реализации радара HP-МСТ
 Table 2. Evaluation of options for the implementation of the IS-MST radar

Вариант / Option	Сроки создания T , дни / Terms of creation T , days	Стоимость создания C , млн руб. / Cost of creation C , million rubles	Трудоёмкость выполнения работ τ , чел/ч / Labor intensity of work execution τ , person/h	Готовность работ K / Works completion K	Осуществимость выполнения работ P / Feasibility of works P	ВЦФ / VOF
Вариант № 1 / Option No. 1	1810	11946	1812713	0,18	0,82	22,3
Вариант № 2 / Option No. 2	1826	13425	2218483	0,11	0,51	31,96
Вариант № 3 / Option No. 3	1820	15682	2084361	0,15	0,72	24,23

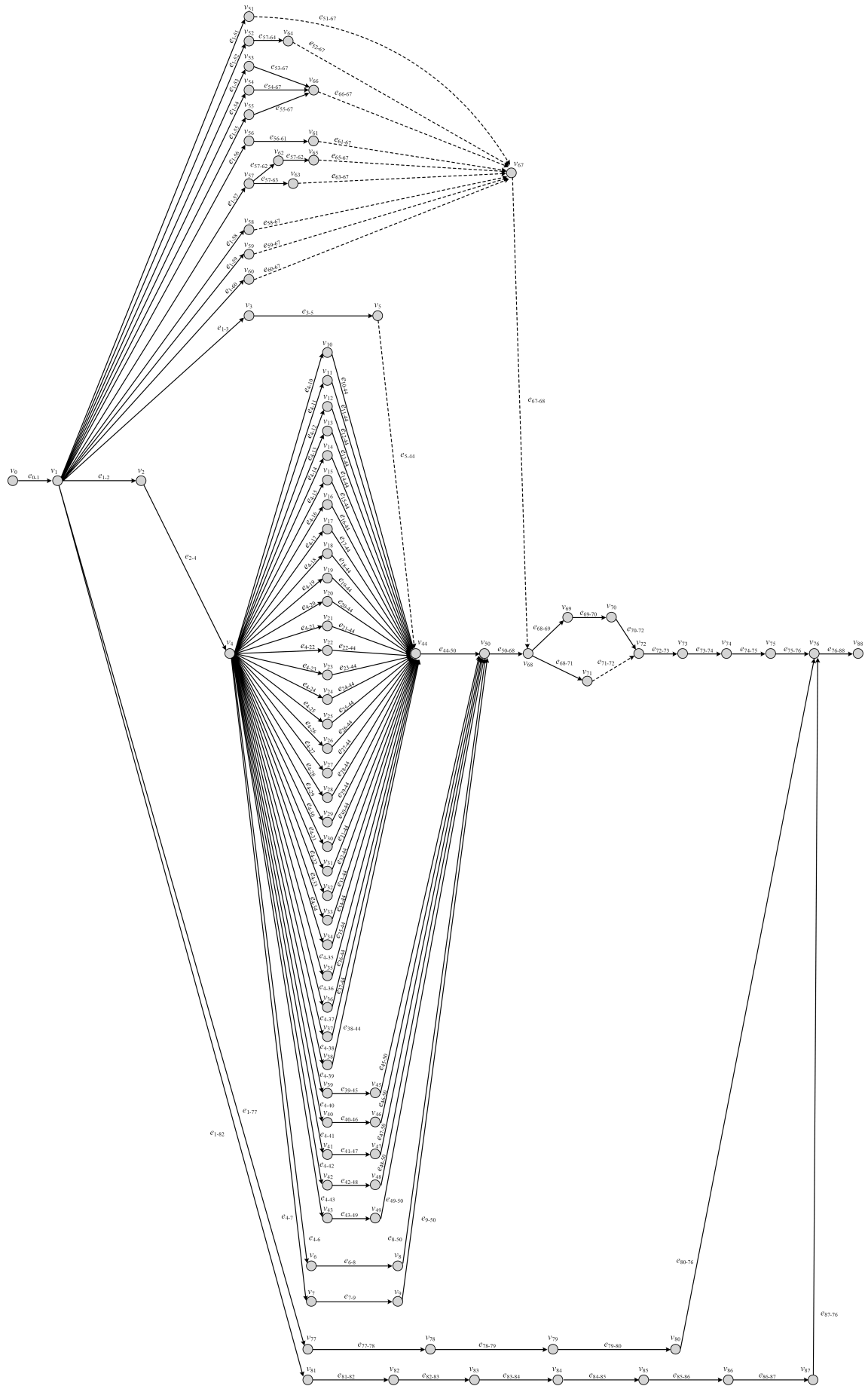


Рисунок 4. Сетевая модель создания HP-MCT
 Figure 4. Network model of creating the IS-MST

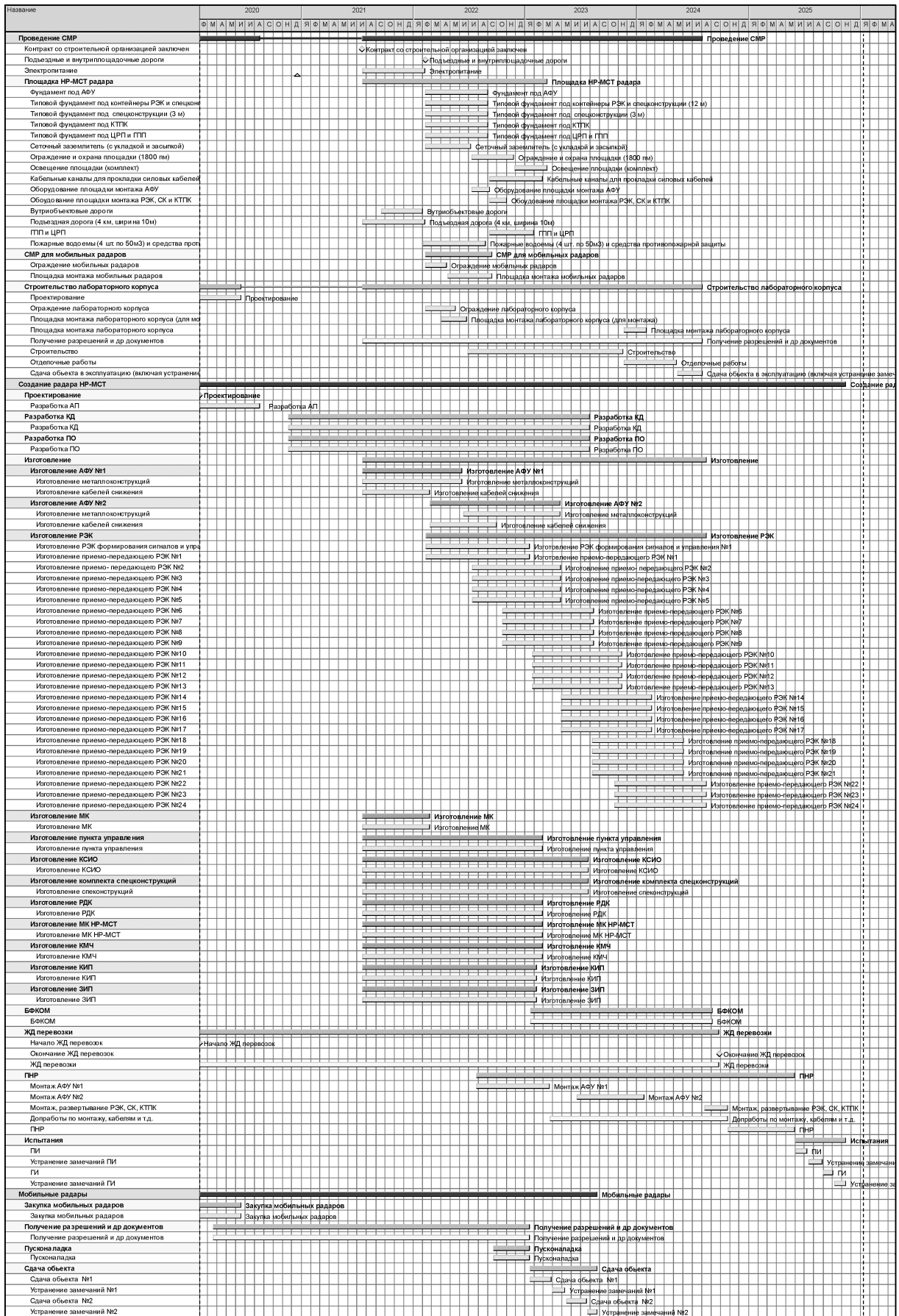


Рисунок 5. Сетевой план-график создания НР-МСТ
 Figure 5. Network schedule for the creation of IS-MST

сокращения стоимости и сроков разработки изделия при количественном и/или качественном улучшении его тактико-технических характеристик. Данное обстоятельство приводит к необходимости использования новых технических и конструктивных решений, что вносит в процесс планирования создания РЛС ДО разного рода неопределенности, которые являются причиной возникновения рисков.

Сложившийся в настоящее время формат календарно-сетевое планирование этапов создания радиолокационных систем дальнего обнаружения не в полной мере обеспечивает эффективный процесс управления процессом создания РЛС ДО, что объясняется отсутствием инструмента, позволяющего достоверно оценивать состояние проекта с учетом неопределенностей. При этом зачастую на практике календарное планирование и управление сводятся к мониторингу текущего состояния проекта, а проектные решения принимаются с опозданием и лишь на основе качественных оценок,

а не количественного анализа. С учетом вышесказанного для планирования и управления процессом создания РЛС ДО была предложена сетевая модель, позволяющая принимать эффективные решения и оперативно реагировать на отклонения параметров сетевого графика.

Проведенные исследования по анализу опыта применения сетевой модели в ходе работ по созданию радара НР-МСТ свидетельствуют о возможности успешного решения такой актуальной задачи, как проектирование и дальнейшее создание РЛС ДО с заданными тактико-техническими характеристиками при наличии временных и финансовых ограничений. А формирование сетевых планов-графиков с учетом данных, получаемых на предварительно разработанной сетевой модели позволяет повысить как точность оценки процесса создания радиолокационных систем дальнего обнаружения, так и адекватность корректировки структуры и параметров процесса разработки РЛС ДО.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Основные результаты данной работы были обсуждены на научно-технической конференции «VII Репинские чтения» в ПАО «МАК «Вымпел».

ACKNOWLEDGMENT

The main results of this work were discussed at the scientific and technical conference «VII Repin Readings» at Vympel PJSC.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боев С.Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 430 с.
2. Перепелица В.А., Тебуева Ф.Б. Дискретная оптимизация и моделирование в условиях неопределенности данных. М.: Акад. Естествознания, 2007. 152 с.
3. Батрова, Р. Г., Глухов С.В. Календарное планирование программ сетевыми методами // Материалы конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Алексея Андреевича Ляпунова, Новосибирск, Академгородок. 8–11 октября 2001 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/Lyap2001/2226/> (дата обращения: 19.07.2020).
4. Новицкий Н.И. Сетевое планирование и управление производством. М.: Новое знание, 2004. 159 с.
5. Таха Х. Введение в исследование операций. Кн. 2. М.: Мир, 1985. 496 с.
6. Метод сетевого планирования разработки сложных технических систем / Р.В. Допира, Р.Ю. Кордюков, А.А. Беглецов, С.В. Сергиенко // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 22–26.
7. Стародубцев И.Ю. Распределение ресурсов в проекте с нечеткими параметрами // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. № 3(75). С. 194–204.
8. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: Монография. Воронеж: «Научная книга», 2010. 284 с.
9. Некоторые аспекты динамической теории графов / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55, № 9. С. 1623–1630.
10. Кочкаров А.А. Структурная динамика: свойства и количественные характеристики предфрактальных графов. М.: Вега-Инфо, 2012. 120 с.
11. Перспективный радар НР-МСТ: потенциал и диагностические возможности / А.П. Потехин, А.Г. Сетов, В.П. Лебедев, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 3–16.
12. Тебуева, Ф. Б., Кабиняков М.Ю. Методы структурирования неопределенностей исходных данных в транспортной задаче с промежуточными пунктами // Вопросы технических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. I междунар. науч.-практ. конф. № 1(1). Новосибирск: СибАК, 2017. С. 14–19.

REFERENCES

1. Boev S.F. *Upravlenie riskami proektirovaniya i sozdaniya radiolokatsionnikh stantsiy dal'nego obnaruzheniya* [Risk management of design and creation of early warning radar stations]. Moscow, Bauman Press Publ., 2017, 460 p. (In Russian).

2. Perepelitsa V. A., Tebueva F. B. *Diskrentnaya optimizatsiya i modelirovanie v usloviyakh neopredelennosti dannikh* [Discrete optimization and modeling in the face of data uncertainty]. Moscow, Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2007, 152 p. (In Russian).
3. Batrova R. G., Glukhov S. V. Programs network scheduling using network methods. *Materialy konferentsii, posvyashchennye 90-letiyu so dnya rozhdeniya Alekseya Andreevicha Lyapunova*. Akademgorodok. Novosibirsk, 8–11 oktyabrya 2001. (In Russian). Available at: <http://www.ict.nsc.ru/ws/Lyap2001/2226/> (accessed 19.07.2020).
4. Novitskiy N. I. *Setevoe planirovanie i upravlenie proizvodstvom* [Network planning and production management]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2004, 159 p. (In Russian).
5. Taha H. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow, Mir Publ., 1985, 496 p. (In Russian).
6. Dopira R. V., Kordiyukov R. Yu., Begletsov A. A., Sergienko S. V. Network planning method for the development of complex technical systems. *Programmnye produkty i sistemy*, 2014, no. 2, pp. 22–26. (In Russian).
7. Starodubtsev I. Yu. Resource allocation in a project with fuzzy parameters. *Informatsionnie tekhnologii modelirovaniya i upravleniya*, 2012, no. 3 (75), pp. 194–204. (In Russian).
8. Golenko-Ginzburg D. I. *Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami: Monografiya* [Stochastic network models of development planning and management: Monograph]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2010, 284 p. (In Russian).
9. Kochkarov A. A., Kochkarov R. A., Malinetskiy G. G. Some aspects of dynamic graph theory. *Zhurnal vychislitel' noy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 2015, vol. 55, no. 9, pp. 1623–1630. (In Russian).
10. Kochkarov A. A. *Strukturnaya dinamika: svoystva i kolichestvennyye kharakteristiki predfraktal'nykh grafov* [Structural dynamics: properties and quantitative characteristics of pre-fractal graphs]. Moscow, Vega-Info Publ., 2012, 120 p. (In Russian).
11. Potekhin A. P., Setov A. G., Lebedev V. P., Medvedev A. V., Kushnarev D. S. Prospective IS-MST radar: potential and diagnostic capabilities. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 3–16. (In Russian).
12. Tebueva F. B., Kabinyakov M. Yu. Methods for structuring source data uncertainties in a transportation task with intermediate points. *Voprosy tekhnicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy: sbornik statey po materialam I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novosibirsk, SibAK Publ., 2017, pp. 14–19. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Боев Сергей Федотович, д. т. н., д. э. н., генеральный директор, ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: +7 (499) 152-95-95, e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Логовский Алексей Станиславович, к. ф. - м. н., генеральный конструктор, АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», 127083, Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: alogovsky@rti-mints.ru.

Казанцев Андрей Михайлович, ведущий инженер, АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», 127083, Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (903) 963-18-21, e-mail: akazantsev@rti-mints.ru.

Ивойлова Анастасия Владимировна, ведущий инженер, АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», 127083, Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: ivoylova@rti-mints.ru.

Тимошенко Александр Васильевич, д. т. н., профессор, заместитель генерального конструктора, АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца, 127083, Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: atimoshenko@rti-mints.ru.

Тришкин Павел Николаевич, заместитель директора НТЦ, главный конструктор, АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца, 127083, Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: trishkin@rti-mints.ru.

AUTHORS

Sergey F. Boev, D.Sc. (Engineering), D.Sc. (Economics), CEO, Vypel PJSC, 1, corp. 10, ulitsa Geroev Panfilovtsev, Moscow, 125480, Russia, tel.: +7 (499) 152-95-95, vimpel@vimpel.ru.

Aleksey S. Logovsky, Ph.D. (Physics and Mathematics), general designer, Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute, 10, stroenie 1, ulitsa 8 Marta, Moscow, 127083, Russia, tel.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: logovsky@rti-mints.ru.

Andrey M. Kazantsev, lead engineer, Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute, 10, stroenie 1, ulitsa 8 Marta, Moscow, 127083, Russia, tel.: +7 (903)963-18-21, e-mail: akazantsev@rti-mints.ru.

Anastasiya V. Ivoylova, lead engineer, Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute, 10, stroenie 1, ulitsa 8 Marta, Moscow, 127083, Russia, tel.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: ivoylova@rti-mints.ru.

Alexander V. Timoshenko, D.Sc. (Engineering), professor, deputy general designer, Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute, 10, stroenie 1, ulitsa 8 Marta, Moscow, 127083, Russia, tel.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: atimoshenko@rti-mints.ru.

Pavel N. Trishkin, deputy director of the Research and Development Center, chief designer, Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute, 10, stroenie 1, ulitsa 8 Marta, Moscow, 127083, Russia, tel.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: trishkin@rti-mints.ru.

Поступила 23.05.2020; принята к публикации 03.08.2020; опубликована онлайн 07.09.2020.
Submitted 23.05.2020; revised 03.08.2020; published online 07.09.2020.