

СОЧЕТАНИЕ АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ ВМФ

Г.П. Пуха (Санкт-Петербург)

Введение. В соответствии с методологией построения систем поддержки принятия решений для пунктов управления связью флотов [1], определение такого качества связи как ее *своевременность* предполагается с учетом текущего состояния *устойчивости* системы связи [2].

В настоящее время исследованию данного свойства организационно-технических систем посвящено достаточно много научных работ, например, [3, 4, 5], в которых трактовки данного понятия в зависимости от предметной области несколько отличаются друг от друга. Однако все они, так или иначе, признают за этим свойством способность систем функционировать в условиях деструктивного воздействия на реализуемый ею процесс.

Для военных же систем связи принято, что такими воздействующими факторами следует считать [6]:

- удары противника оружием по объектам системы;
- подавление помехами или нарушение работы противником линий связи;
- выход из строя технических средств связи, связанные с ограничениями такой их характеристики – как «наработка на отказ».

Учет только первой группы факторов, воздействию которых подвергаются в основном узлы связи трактуется, обычно, как *живучесть* системы, второй группы – от воздействия которых нарушается функционирование линий связи чаще трактуется как ее *помехоустойчивость*, а при учете только третьей группы факторов – исследуется, как правило, ее *надежность*.

Таким образом, в нашем случае, исследование *устойчивости* систем связи ВМФ будет предполагать анализ: и факторов устойчивости узлов, и помехоустойчивости линий связи, и надежности их технических средств. Как правило, идет речь о береговой части систем связи флотов, как о системообразующей, *опорной (или транспортной) сети связи*, включающей узлы связи пунктов управления и линии связи, их соединяющие, для которых, как показывает опыт ведения современных боевых действий, приоритетным свойством становится их способность функционировать в условия воздействия оружия противника, то есть – *живучесть* [7].

С этой точки зрения объекты исследования можно разделить на такие классы, как:

- системы, состоящие из уникальных точечных объектов (сеть радиостанций различных диапазонов, станции космической связи и т.д.);
- системы, состоящие из узлов связи, являющихся неточечными целями и включающие стационарные центры связи с типовыми, массовыми средствами связи (приемные и передающие центры), полевые узлы, что позволяет осуществлять резервирование системы не только центрами связи, но и средствами радиосвязи;
- опорные системы связи флотов, в которых центры связи являются точечными целями, но в одном случае используются только узлы (центры) связи пунктов управления, а во втором - все центры связи, входящие в данный узел связи, т.е. оценке подлежит живучесть системы межцентровой связи.

В зависимости от принадлежности подсистемы связи к одному из классов следует, очевидно, осуществлять и выбор соответствующих математических схем для формирования их моделей, в интересах получения значения выбранных показателей, то есть – определение методов оценки устойчивости [8].

В то же время (независимо от выбранной схемы решения задачи) общими исходными данными для этих методов будут являться:

- модели нанесения удара;
- характеристики элементов (центров) системы связи;
- структурные характеристики системы или сети связи;
- показатели живучести системы (сети) связи.

Модель нанесения удара в общем случае должна включать:

■ группировку противника, предназначенную для разрушения или способную разрушить систему управления и связи;

- объекты воздействия (пункты управления, узлы связи и т.д.);
- динамику нанесения ударов;
- носители оружия, способы их применения, общее количество;
- количество средства поражения, их тротиловый эквивалент;
- точность наведения;
- эффективность средств противоздушной обороны.

Характеристики системы связи включают в себя:

- задачи, требования к системе связи по обеспечению управления;
- топологию системы или сети связи;
- распределение основных и резервных средств;
- способы резервирования и условия ввода резерва.

Характеристики объектов связи должны состоять из:

- структуры и топологии, если объект протяженный;
- степень защищенности;
- количества основных средств связи, соотношения задействованных и резервных средств.

При выборе показателей устойчивости в исследованиях в области военной связи, как правило, также различают [8]:

- структурные, к которым можно отнести показатели, характеризующие только связность элементов системы без учета ограничений и требований к качеству связи и алгоритмам функционирования системы связи и

- функциональные, которые необходимы при учете ограничений, накладываемых на используемые пути связности, требования к качественным характеристикам каналов и алгоритмов функционирования.

Поскольку основной целью функционирования систем связи вообще, а военных – тем более, является передача сообщений в любом направлении связи, то есть - между любой парой абонентов, то для оценки живучести, помехоустойчивости, надежности и - устойчивости в целом военных сетей связи, как технологической основы систем, целесообразно, на наш взгляд, использовать следующие показатели:

- вероятность сохранения хотя бы одного пути между двумя произвольными объектами, что эквивалентно вероятности сохранения связности сети;

- вероятность сохранения хотя бы одного пути между заданными абонентами;

- вероятность сохранения не менее заданного числа путей между заданными абонентами;

- вероятность сохранения не менее заданного числа путей определенного качества между заданными абонентами.

Таким образом, первые два показателя могут характеризовать упомянутую выше структурную *устойчивость* сети, и является лишь необходимым формальным условием связности.

В реальных условиях всегда имеются ограничения на использование путей, определяемые количеством допустимых транзитов, возможностями сопряжения аппаратуры,

алгоритмами управления нагрузкой и выбора путей и т.д. В этих случаях, третий и четвертый показатели являются примерами показателей, учитывающих накладываемые ограничения на работу сети и определяющие ее *функциональную устойчивость*.

Для решения подобных задач в большинстве случаев применяется математический аппарат теории графов [9], предполагающий детерминированность их структуры. И поскольку модели, представленные в виде графа, и соответствующие им математические выражения для определения показателей живучести, помехозащищенности и надежности, как правило, эквивалентны, то есть смысл формировать лишь одну модель, имея в виду, что весовые коэффициенты вершин графа будут отражать состояние узлов и задаваться, например, вероятностью их сохранения работоспособности после удара или по техническим характеристикам, а весовые коэффициенты ребер – состояние линий, которые можно задавать, например, вероятностью их не подавления или не разрушения. Более того, в некоторых случаях удобно вообще весовые коэффициенты вершин пересчитывать в весовые коэффициенты ребер, определяя устойчивость сети в целом через их весовые коэффициенты [10].

В зависимости от характера задачи и способа ее решения применяются различные варианты задания весовых коэффициентов и способы их пересчета, а для вычисления перечисленных выше показателей могут быть использованы как *аналитические* методы [3, 4, 5], так и методы *имитационного* моделирования [11].

Так, например, для расчета показателей структурной устойчивости направлений связи *аналитическими методами* используют их представление в виде множества путей и сечений, перечисления которых между произвольными вершинами может быть реализовано с помощью операций булевой алгебры. При этом о значении диагональных элементов матрицы договариваются заранее исходя из сущности решаемой задачи [8].

В этом случае, если заданы весовые коэффициенты ребер P_{ij} и вершин P_i , образующих пути между двумя произвольными вершинами a_s и a_t , то вероятность существования k -го пути из вершины a_s к вершине a_t равна произведению весовых коэффициентов элементов, входящих в заданный путь μ_{st}^k :

$$P(\mu_{st}^k) = \prod_{\forall b_{ij} \in \mu_{st}^k} P_{ij} \cdot \prod_{\forall a_e \in \mu_{st}^k} P_e, \quad (1)$$

где $\forall$ - квантор общности, а выражение $\forall b_{ij} \in \mu_{st}^k$ читается так: «для всякого ребра b_{ij} , входящего в k -й путь μ_{st}^k между вершинами a_s и a_t ».

Для нарушения связности между двумя вершинами необходимо либо нарушить все пути, либо вывести из строя ребра хотя бы одного сечения. В предположении, что все пути работают параллельно, а все сечения последовательно, используя формулы для последовательного и параллельного соединения элементов, можно записать оценки для нижней (по сечениям) и верхней (по путям) границ устойчивости:

$$\prod_{\forall \sigma_{st}^l \in S_{st}} [1 - \prod_{\forall b_{ij} \in \sigma_{st}^l} (1 - P_{ij})] \leq \rho_{st} \leq 1 - \prod_{\forall \mu_{st}^k \in M_{st}} [1 - \rho(\mu_{st}^k)] \quad (2)$$

где σ_{st}^l - l -сечение между вершинами a_s и a_t ;

S_{st} - множество сечений между вершинами a_s и a_t ;

M_{st} - множество путей между вершинами a_s и a_t .

Верхняя граница превышает значение ρ_{st} за счет предположения о независимости путей, а нижняя оценка ниже реальной за счет того, что множество сечений S_{st} может быть избыточным.

Ниже приведена иллюстрация такого варианта решения несложной задачи по определению вероятности ρ_{15} связности графа между вершинами a_1 и a_5 для сети связи с весовыми коэффициентами ребер $P_{ij}=0,9$; $P'_{ij}=0,8$; $P''_{ij}=0,5$ (рис. 1):

Множество сечений получается после нахождения двойственной булевой функции выражения:

Множество сечений S_{15} содержит 48 элементов, состоящих из трех ребер. Используя выражения (1) и (2) для p_{st} , получим верхнюю $\overline{p_{15}}$ и нижнюю p_{15} оценки:

$$0,00164 \leq p''_{15}(0,5) \leq 0,232.$$

Очевидно, что с ростом размерности сети соответственно возрастает громоздкость и сложность выполнения подобных аналитических расчетов даже для одной пары узлов. При желании же получить значение показателя живучести для других пар корреспондентов потребуется полностью изменять аналитические модели и заново повторять решение задачи.

Заметно облегчить ситуацию позволяет применение для решения аналогичных задач логико-вероятностного метода [12, 13], и программная автоматизация составления логических выражений указанных видов по заданным исходным данным модели системы (сети) детерминированной структуры, представленной в виде так называемой схемы функциональной целостности [14]. Однако с его помощью одноразово также может быть получен результат только для одной пары узлов графа, то есть определить устойчивость только направления связи.

Кардинально разрешить данное противоречие возможно, на наш взгляд, если для получения случайных значений весовых коэффициентов вершин поэтапно организовать соответствующую *имитацию* их состояния. При этом, после каждого розыгрыша для поиска возможных путей различной длины между произвольными вершинами графа воспользоваться процедурой преобразования его матрицы смежности с помощью операций возведения ее в степень до получения полно связной структуры графа по правилам обычной алгебры (например, реализовав алгоритм Уоршелла). Тогда, набрав необходимую статистику можно получить желаемый результат – оценку устойчивости всей системы (сети) связи сразу по всем направлениям, не изменяя при этом имитационную модель системы [9].

Для иллюстрации такого подхода рассмотрим вариант решения задачи, когда противник воздействует оружием только на узлы связи (то есть – оценим только живучесть опорной сети с ограничением на число транзитов – не более 3-х) (рис. 2).



Рис. 2. К задаче по оценке живучести опорной сети связи

Схема сети и ее матрица смежности $P_{ж}=|P_{ij}|$ представлена на рис. 3. На главной диагонали расположены вероятности сохранения узлов при воздействии противника. Поскольку матрица симметрична, то с целью экономии памяти ее можно задать и в треугольном виде. $P_{ij}=1$, если вершины связаны, и $P_{ij}=0$ в противном случае.

Алгоритм решения задачи в соответствии с изложенной выше идеей может быть представлен так, как показано на рис. 4, где:

Блок А. Ввод исходных данных. Задается $P=|P_{ij}|$, N^* – число реализаций розыгрыша, текущему значению N присваивается единица.

Блок В. Для $i=1,10$ вызывается случайное число r_i . Если $r_i > P_i$ то вычеркивается i -я строка и i -й столбец, так как узел выходит из строя вместе со своими связями.

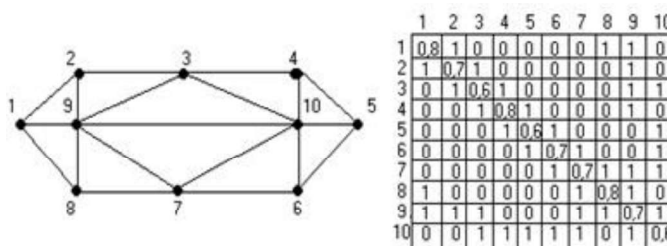


Рис. 3. Пример расчета функциональной живучести сети с ограничением числа транзитов

Блок С. Определяет сохранившуюся матрицу $|A^*_{(N)}|$ в результате N-го розыгрыша, например, табл. 1:

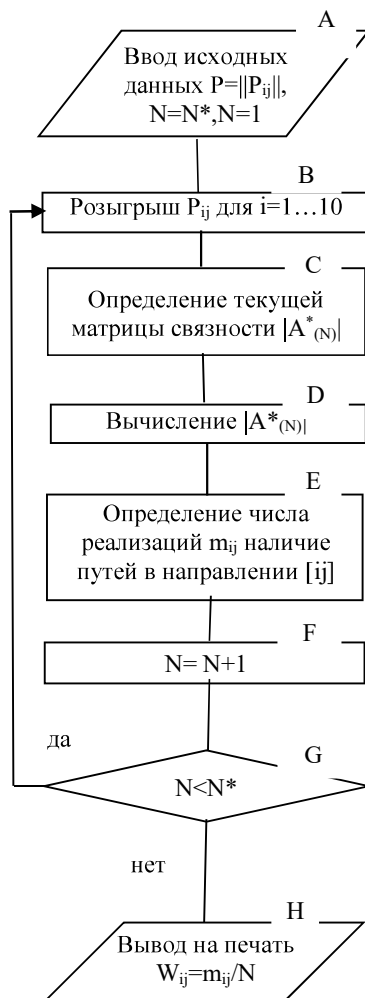


Рис. 4. Алгоритм решения задачи

1. Результаты одного розыгрыша (вариант)

a_i	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
P_i	0,8	0,7	0,6	0,8	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6
r_i	0,9	0,29	0,58	0,93	0,82	0,73	0,38	0,86	0,42	0,14

N=1

Если в результате розыгрыша разрушены узлы a_1, a_4, a_5, a_6, a_8 вместе со своими связями, то матрица $A^*_{(1)}$ примет следующий вид:

$$|A^*_{(1)}| \begin{vmatrix} 2 & 3 & 7 & 9 & 10 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad |A^*_{(1)}|^2 \begin{vmatrix} 2 & 3 & 7 & 9 & 10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Поскольку $|A^*_{(1)}|^2=1$, то вычислять $|A^*_{(1)}|^4$ нет необходимости, так как между всеми сохранившимися узлами существуют двухзвенные пути (второго ранга, одно транзитные пути).

Блок Д. Последовательно вычисляет значения

$$|A^*_{(N)}|^2=|A_{(N)}| \bullet |A_{(N)}| \text{ и } |A^*_{(N)}|^4=|A^*_{(N)}|^2 \bullet |A^*_{(N)}|^2.$$

Блок Е. Подсчитывает число положительных исходов m_{ij} , характеризующихся наличием путей между сохранившимися узлами рангом не более 4.

С целью иллюстрации действия алгоритма есть смысл привести еще несколько розыгрышей по таблице случайных чисел r_i .

2. Результаты следующих розыгрышей (вариант)

	P_i	0,8	0,7	0,6	0,8	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6
$N=2$	a_i	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
	r_i	0,3	0,96	0,33	0,48	0,9	0,69	0,07	0,95	0,88	0,95
$N=3$	a_i	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
	r_i	0,02	0,8	0,22	0,61	0,77	0,93	0,36	0,69	0,13	0,78
$N=4$	a_i	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
	r_i	0,17	0,01	0,34	0,76	0,35	0,80	0,75	0,32	0,74	0,92

$$|A^*_{(2)}| = \begin{vmatrix} & 1 & 3 & 4 & 6 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} |A^*_{(2)}|^2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} |A^*_{(2)}|^4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$|A^*_{(3)}| = \begin{vmatrix} & 1 & 3 & 4 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} |A^*_{(3)}|^2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} |A^*_{(3)}|^4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$|A^*_{(4)}| = \begin{vmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 8 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} |A^*_{(4)}|^2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} |A^*_{(4)}|^4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

В результате работы операторов блока Е получается матрица, элементами которой являются числа m_{ij} положительных исходов, при которых выполняется условие наличия пути между узлами a_i и b_j рангом не более 4^{-х}, т.е. числом транзитов не более 3 (таблица $M_{(4)}$).

$$|M_{(4)}| = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 4 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 3 & 3 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 3 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

Для диагональных элементов – это количество случаев, при которых i -й узел сохранился.

m_{11} – это число реализаций, при которых сохранился узел a_1 $m_{11}=3$;

m_{12} – есть только при четвертом испытании - это связь между a_1 и a_2 ;

m_{13} – при 3 и 4 испытании – связь a_1 - a_3 .

Аналогичным образом определяется остальные элементы матрицы $M_{(N)} = |m_{ij}|$.

Блок F. Счетчик реализаций.

Блок G. Проверяет условие окончания имитационного эксперимента, определяемого заданным числом N^* . Необходимое число реализаций N^* , обеспечивающее заданную точность и надежность результатов, определяется из известных соотношений между числом испытаний n , доверительной вероятностью α и доверительным интервалом 2ε . Однако в данном случае можно заранее N^* не устанавливать, а поскольку значение диагональных элементов известны точно, то условие окончания эксперимента можно определить, например, как

$$\max_i |P_{ii} - m_{ii} \setminus N| \leq \varepsilon \quad (3)$$

Блок H. Вычисляет значение показателя живучести W_{ij} для направления $[ij]$ и выдает его на печать.

Так, если процесс моделирования окончится на 4-ом шаге, то на печать будет выдана матрица $W_{ij(4)}$ (табл. 2).

3. Результирующая матрица связности (вариант)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
W _{ij} =	1	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0	0,25	0,5	0,25	0	P ₁₁ -m ₁₁ /N=	0,05
	2	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0	0,25	0,25	0,25	0,25	P ₂₂ -m ₂₂ /N=	0,20
	3	-	-	1	-	-	-	0,5	-	-	-	P ₃₃ -m ₃₃ /N=	0,40
	4	-	-	-	0,75	-	-	0,25	-	-	-	P ₄₄ -m ₄₄ /N=	0,05
	5	-	-	-	-	0,25	-	0	-	-	-	P ₅₅ -m ₅₅ /N=	0,35
	6	-	-	-	-	-	0,25	0,25	-	-	-	P ₆₆ -m ₆₆ /N=	0,35
	7	0,25	0,25	0,5	0,25	0	0,25	0,75	0,25	0,5	0,25	P ₇₇ -m ₇₇ /N=	0,05
	8	-	-	-	-	-	-	0,25	0,5	-	-	P ₈₈ -m ₈₈ /N=	0,30
	9	-	-	-	-	-	-	0,5	-	0,5	-	P ₉₉ -m ₉₉ /N=	0,20
	10	0	0,25	0,25	0	0	0	0,25	0	0,25	0,25	P ₁₀ -m ₁₀ /N=	0,35

$$\max_i |P_{ii} - m_{ii} \setminus N| = 0,4.$$

Обычно ε задает в пределах 0,001-0,05. В нашем случае до окончания эксперимента, очевидно, еще далеко.

Для того, чтобы учесть воздействие противника и на каналы связи для учета, например, и помехоустойчивости линий связи приведенный алгоритм необходимо дополнить еще блоками так, как показано на рис. 5.

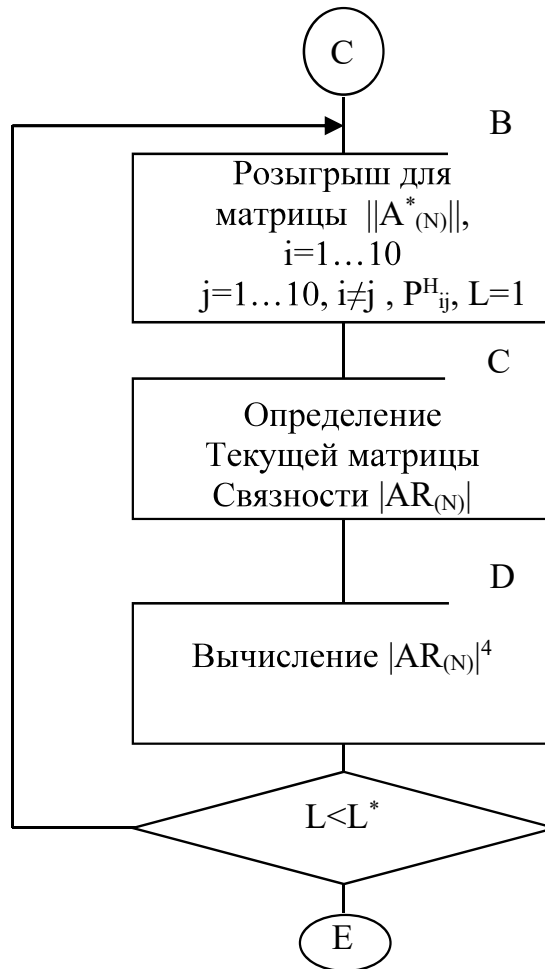


Рис. 5. Фрагмент алгоритма учета преднамеренных помех

Оператор В для сохранившейся после имитации удара матрицы связности $|A^*_{(N)}|$ производит розыгрыш воздействия преднамеренных помех на каналы связи. Разделение блоков В и В¹ связано с реальной физикой воздействия оружия и помех, вследствие этого различием в статистических характеристиках процессов нарушения (восстановления) каналов связи.

Значения матрицы вида W_{ij} , полученные в результате работы методики, которая предполагает: *имитацию* при определении состояния объектов исследуемой сети и *аналитические операции* для вычисления вероятности сохранения хотя бы одного пути между каждой пары ее корреспондентов, и будут представлять собой показатели устойчивости любого из заданного направлений связи.

Анализ содержания и структуры исходных данных для выполнения данного алгоритма показывают, что их объем имеет квадратичную зависимость от размерности моделей исследуемых систем, поэтому его, очевидно, следует отнести к алгоритмам класса $O(n^2)$, которые характеризуются средней временной и пространственной сложностью. В то же время, варианты программной реализации решения рассматриваемой задачи предложенным способом не вызывают особенных осложнений у программистов средней квалификации. И даже в сочетании с пользовательским интерфейсом и базой данных для хранения исходных данных и результатов расчетов объем программного обеспечения может составить порядка 15–20 Мбайт, а время моделирования в ходе решения одного варианта для сети из десятка узлов не превышает, как и положено для алгоритмов этого класса – одной секунды.

Заключение

Таким образом, разумное сочетание аналитического и имитационного методов моделирования позволяет не только более адекватно отображать процессы, которые формализуются с использованием аппарата теории графов, но и за счет достаточно простой программной реализации предложенного алгоритма существенно сократить трудоемкость решения задач связанных, в частности, с оценкой устойчивости систем связи объединений ВМФ.

Литература

1. **Драчёв Р.В., Попов П.В., Пуха Г.П.** Построение систем интеллектуальной поддержки принятия решений в интересах управления связью ВМФ с использованием метода управления элементами сложных радиоэлектронных систем // Морской сборник. 2014. №11 С. 41-47.
2. **Драчев Р.В., Пуха Г.П.** К вопросу об «основных параметрах» системы связи ВМФ // Морская радиоэлектроника. 2024. № 3 (89). С. 38-44.
3. **Павлов А.Н., Павлов Д.А.** Подход к прогнозированию структурной устойчивости сложных объектов. Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С.
4. **Воеводин В.А.** О прогнозировании устойчивости функционирования системы безопасности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ), подверженных воздействию угроз. <https://cyberrus.info/wp-content/uploads/2025/11/vokib-2025-5-st04-s041-049.pdf>.
5. **Данелян Т.Я., Смирнов В.Д., Епихин М.Н.** Подход к оценке устойчивости системы через моделирование организационной структуры объекта. https://ecsn.ru/wp-content/uploads/201701_43.pdf.
6. Связь военная. Термины и определения. ГОСТ РВ 0158-006-2018.
7. **Пуха Г.П.** Интеллектуальная поддержка принятия решений в интересах управления связью ВМФ (учебник с грифом УМО) - СПб: ВУНЦ ВМФ «Воен.-мор. акад.». 2025. 632 с.: ил.
8. Методы математического моделирования систем и процессов связи / **В.Н. Куделя, А.А. Привалов, О.В. Петриева, В.П. Чемиренко** / под общ. ред. В.П. Чемиренко. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 368 с.
9. **Харрари Р.** Теория графов. М.: Мир, 1980.
10. **Пуха Г.П.** Метод имитационного моделирования и его применение в интересах исследования систем связи ВМФ // СПб: ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2024. 345 с.
11. **Moshnikov, A.; Bogatyrev, V.** Risk Reduction Optimization of Process Systems under Cost Constraint Applying Instrumented Safety Measures. Computers 2020, 9, 50.
12. **Рябинин И.А., Черкесов Г.Н.** Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981, 286 с.
13. **Можаев А.С., Громов В.Н.** Теоретические основы общего логико-вероятностного метода, автоматизированного моделирования систем. – СПб: ВИТУ, 2000. 145 с.
14. **Можаев А.С., Гладкова И.А.** Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Свидетельство об официальной регистрации №2003611099. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003, 1 с.