

ОБЗОР И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ СВЯЗИ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ

УДК 358.111.6

С. И. Паскробка, Ю. Е. Кулешов,
В. А. Сергиенко, А. А. Родионов*

Множество методов расчета показателей живучести сетей связи, как и любой другой сложной системы, делятся на два самостоятельных подмножества: точных и приближенных. Практическое применение того или иного метода определяется наличием исходных данных для расчета соответствующих показателей. В статье предлагаются обзор и анализ существующих методов расчета показателей живучести сетей связи и выбор рациональных в соответствии с современными требованиями к управлению войсками.

Great number of methods of calculation of indexes of vitality of communication networks, as well as any other difficult system, divided by two independent subsets: exact and close. Practical application of one or another method is determined the presence of basic data for the calculation of the proper indexes. In the article a review and analysis of existent methods of calculation of indexes of vitality of communication networks and choice rational in accordance with modern requirements to the management troops are offered.

Живучесть системы связи характеризует ее способность выполнять поставленные задачи в условиях воздействия поражающих факторов всех видов современного оружия, противостоять внешним поражающим воздействиям и сохранять работоспособность в экстремальных ситуациях [1].

В боевых условиях элементы системы подвижной радиосвязи (СПРС) будут подвергаться постоянному огневому воздействию противника на протяжении всего периода боевых действий. По своей повторяемости, продолжительности и степени поражения огневое воздействие можно разделить на две группы:

к первой группе следует отнести огневые удары с применением или без применения высокоточного оружия, которые воздействуют на систему связи или отдельные ее элементы кратковременно. Такое воздействие может с достаточной степенью точности характеризоваться вероятностным законом распределения во времени с параметрами исправной работы сети связи по живучести. В сети связи при этом происходит полный набор событий – функционирование, выход из строя, простой (восстановление), функционирование;

ко второй группе относятся факторы, не обладающие устойчивой повторяемостью за время функционирования сети связи в одном периоде боевых действий и приводящие, как правило, к безвозвратным потерям большого количества средств связи на достаточно большой площади или к длительному их восстановлению. Такая ситуация возможна при массированных ракетно-авиационных ударах. Характерным для них является то, что в одной операции их будет несколько, время нанесения удара (в сравнении с временем всей операции) мало и восстановление сети связи начинается в основном после их окончания.

Показатели живучести на всех уровнях оценки должны характеризовать свойство живучести сети связи, воздействие наиболее существенных внешних факторов, внутренних связей и условий нормального функционирования. Показатели живучести должны быть связаны в первую очередь с требованиями обеспечения устойчивости, непрерывности, оперативности, скрытности и качества управления. Кроме того, показатели живучести должны иметь хорошую смысловую трактовку, чувствительность к исследуемым характеристикам сети и изменениям внешних и внутренних факторов, определяющих живучесть сети связи, практическую возможность использования математических моделей и методов их расчета. При этом научная новизна проделанной авторами работы будет

заключаться в выборе рационального метода расчета показателей живучести исходя из проведенного обзора и анализа существующих методов.

Практическое применение того или иного метода расчета показателей живучести определяется постановкой задачи, необходимостью разработки или возможностью применения того или иного программного обеспечения, степенью точности исходных вероятностей $P(z_i)$ исправности элементов и размерностью оцениваемой сети связи. Методы (методики) расчета показателей живучести сетей связи, согласно [1], могут быть классифицированы как точные аналитические или приближенные.

Некоторые точные (аналитические) методы разработаны только для заданных конкретных конфигураций сетей связи. Множество аналитических методов можно разделить на методы, предназначенные для произвольных и для специальных структур, которые, в свою очередь, содержат восемь подмножеств, отличающихся друг от друга используемым математическим аппаратом. К ним относятся методы, основанные на теории игр, теореме разложения, булевой алгебре, использующие интегро-дифференциальные уравнения, методы прямого перебора состояний системы и состояний путей, корреляционные и комбинированные методы.

Большое число аналитических методов расчета характеризует попытки оценить живучесть сетей связи без какой-либо погрешности при практически приемлемых затратах вычислительных ресурсов или объеме ручного счета. Однако очень высокая размерность оцениваемых сетей связи ограничивает возможности точных методов. По мере повышения возможностей точных методов усложняются методики расчета, а следовательно и алгоритмы. Любой из точных методов неприемлем при достаточно большой размерности оцениваемой сети (размерность оценивается числом допустимых путей, числом элементов или их суммой), поэтому зачастую оценка живучести производится приближенными методами.

Методы (методики) оценки живучести сетей связи, в которых используются интегро-дифференциальные уравнения и теория игр, вообще не нашли практического применения прежде всего из-за их сложности, и в статье не рассматриваются.

Приближенные методы также делятся на два подмножества: приближенные аналитические методы и методы статистического моделирования (сокращенного перебора состояний, преобразования «треугольник – звезда»). Применение любого из приближенных методов неизбежно приводит к некоторым погрешностям оценки.

Погрешность при использовании большинства аналитических приближенных методов задается. Исключение составляют методы, основанные на преобразованиях типа «треугольник – звезда». Некоторыми из аналитических методов оцениваются приближенные верхние и нижние границы значений и показателей, которые можно затем усреднить. Такие методы для небольшого числа элементов сети связи незаменимы для ручного счета. Недостатком некоторых из них является трудность определения не только значения, но и знака погрешности.

Погрешность задается и при использовании методов статистического моделирования, в основу которых положен перебор состояний системы. И в том, и в другом случаях погрешность определяется суммарной вероятностью возникновения событий, которые при заданных исходных данных считаются практически неосуществимыми. Например, для системы связи из N элементов, в которой случайное число отказавших элементов распределено нормально со средним $\bar{m} = 0,01N$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,01N$, практически неосуществимым можно считать событие, когда в системе одновременно в состоянии отказа находится $k \geq 0,03N$ элементов.

При использовании приближенных методов необходимо, чтобы выполнялось важнейшее правило: погрешность исходных данных не должна превышать погрешность метода расчета.

Методы прямого перебора состояний элементов сети связи. Расчет показателей живучести методами прямого перебора состояний элементов сети связи предполагает независимость возникновения отказов ее элементов и наличие у каждого элемента двух взаимоисключающих друг друга состояний: полностью исправен или полностью неисправен.

Последовательно рассматривается вероятность связности каждой двухполюсной системы (ДС) в сети в зависимости от отказов одного или совокупности элементов. При этом критерием связности ДС является наличие в ней хотя бы одного исправного пути. Отличие модифицированного метода состоит в организации перебора состояний не всех элементов многополюсной сети, а для каждой ДС отдельно, что облегчает анализ сети при возрастании числа ее элементов.

Данные методы используются при оценке живучести сети связи при $N = 20 \dots 25$, а также благодаря простоте алгоритмов в качестве вспомогательного средства для проверки правильности расчетов более сложными методами.

Методы прямого перебора состояний путей сети связи. Вторую группу методов, в которых используется принцип прямого перебора, составляют методы перебора состояний путей ДС. Двухполюсная сеть (направление связи) отображается множеством путей M , и ставится задача вычисления исправности хотя бы одного из них. Если все пути ДС структурно независимы между собой, то согласно [1]

$$p(E) = 1 - \prod_{i=1}^h [1 - p(e_i)], \quad (1)$$

где $p(E)$ – вероятность исправности ДС;

$p(e_i)$ – вероятность исправности i -го пути, представленного комбинацией элементов e ;

h – общее число путей.

Так как состояния большинства путей ДС коррелированы друг с другом, то (1) – это оценка $p(E)$ сверху. Сущность методов прямого перебора путей состоит в представлении (1) в виде

$$p(E) = \sum_{i=1}^{J_1} p(e_i) - \sum_{i < v}^{J_2} p(e_i e_v) + \dots + (-1)^{h-1} p(\bigwedge_{i=1}^h e_i). \quad (2)$$

Последняя формула представляет собой вероятность суммы совместных независимых событий [2]. Здесь $J_n = C_h^n$, $n = 1, \dots, h$.

В более компактном виде выражение (1) имеет вид

$$p(E) = \sum_{n=1}^h (-1)^{n-1} p(E^n),$$

где $p(E^n)$ – вероятность исправности хотя бы одного подмножества I_{nk} путей определяется из выражения

$$p(E^n) = \sum_{k=1}^{J_n} p(I_{nk}), \quad n = 1, \dots, h.$$

Подмножество I_{nk} содержит k -ю комбинацию n путей из общего числа сочетаний из h по n , $n = 1, \dots, J_n$.

Для исключения корреляции состояний путей при вычислении $p(I_{nk})$ можно применить два подхода. Первый подход основан на вычислении условных вероятностей исправности путей в слагаемых (2). При этом

$$p(I_{nk}) = p(e_i) p(e_v | e_i) \dots p(e_j | e_i e_v \dots).$$

Это произведение содержит n сомножителей. Условные вероятности

$$p(e_j | e_i e_v \dots) = \frac{p(e_j)}{\prod_{\substack{\varepsilon_k \in \varepsilon \\ \varepsilon_k \neq e_j}} p(\varepsilon_k)},$$

где ε – множество элементов ДС, общих для пути μ_j и путей μ_1, μ_v, \dots , а

$$p(e_j) = \prod_{\substack{\varepsilon_h \in \mu_j \\ \varepsilon_h \in \mu_j}}^{r(\mu_j)} p(\varepsilon_h).$$

При втором подходе используется свойство логического сложения булевых переменных: $a_1 + a_2 + a_3 + \dots = a$. Тогда

$$p(I_{nk}) = \prod_{\gamma \in \delta} p(\gamma),$$

где δ – объединение элементов путей $\mu_v \in I_{nk}$.

Указанное свойство применяется при формировании множества δ . Применение преобразований булевой алгебры более экономично по сравнению с вычислением условных вероятностей.

Область практического применения метода перебора состояний путей сети связи в основном совпадает с областью применения метода перебора состояний ее элементов. Он применяется для практического вычисления $p(E)$ при большом числе элементов, но небольшом числе путей в каждой ДС. Ввиду простоты применения, а также исходя из рассмотренной структуры системы подвижной радиосвязи (СПРС) может применяться и для оценки ее живучести.

Методы с применением теоремы разложения. Методы с применением теоремы разложения применяются в основном для вычисления показателей надежности сложных систем, которые имеют элементы, не позволяющие производить вычисление по формулам последовательно-параллельного соединения. Теорема разложения читается следующим образом: функция надежности $p(E)$ системы, состоящей из N ненадежных элементов, равна произведению вероятности исправного состояния i -го элемента на функцию надежности системы из $(N-1)$ элементов при условии, что i -й элемент замкнут накоротко, плюс произведение вероятности отказа i -го элемента на функцию надежности системы из $(N-1)$ элементов при условии, что i -й элемент разомкнут. Происходит последовательное преобразование системы с применением теоремы разложения, затем применяется формула полной вероятности.

Использование теоремы разложения для расчета живучести сетей связи ограничивается тем, что она сформулирована при условиях абсолютно надежных узлов и неориентированных ребер графа. В сетях связи это не всегда выполняется. Для того чтобы можно было применить теорему разложения, требуется выполнить сложные преобразования исходного графа сети. Сравнительный анализ показывает, что время вычисления $p(E)$ с применением теоремы разложения даже для простых структур соизмеримо со временем, затраченным на расчет при использовании методов прямого перебора.

Методы с применением преобразований булевой алгебры. Отличие методов с применением преобразований булевой алгебры, или логико-вероятностных, от вышеизложенных в том, что, во-первых, исключается принцип перебора и, во-вторых, на каждом шаге алгоритма производятся операции не с числами, а с булевыми переменными [1, 3]. На последнем шаге алгоритма заканчивается составление выражения $p(E)$ через исходные вероятности исправности элементов системы, т. е. переменные заменяются их вероятностными значениями.

Сущность логико-вероятностных методов заключается в назначении соответствия между численными значениями вероятностей состояний элементов $p(\varepsilon_i)$, $q(\varepsilon_i)=1-p(\varepsilon_i)$ и булевыми переменными $БП$, принимающими значение «ноль» или «единица». Выражение функции $p(E)$ через булевы переменные $БВ(E)$ (булевы выражения) определяется простой формулой параллельного соединения путей ДС

$$БВ(E) = 1 - \prod_{k=1}^h [1 - БВ(e_k)], \quad (3)$$

где $БВ(e_k)$ – выражение функции $p(e_k)$ через переменные $БП$.

Формула (3) при ее разворачивании содержит 2^h слагаемых, которые обозначим $БС_i$, $i=1, \dots, N(БВ)$. Слагаемые $БС_i$ в (3) вычисляются с применением свойства логического произведения

$$БС_v БС_v БС_v \dots = БС_v. \quad (4)$$

Для упрощения преобразований по (3) при расчетах после формирования множества путей M производится перенумерация элементов рассматриваемой ДС порядковыми числами $1, 2, \dots, N$. Алгоритм вычисления $p(E)$ при представлении ДС множеством M имеет h шагов. На первом шаге согласно (3)

$$BB(E)_1 = BB(e_1) = BC_1.$$

Шаг $k, k \geq 2$ выполняется в два этапа. На первом этапе производится логическое умножение каждого слагаемого выражения $BB(E)_{k-1}$ на $BB(e_k)$ с учетом (4). Умножение заключается в дописывании к выражению $BB(E)_{k-1}$ со знаком плюс слагаемого $BB(e_k)$, а также $2NBB(E)_{k-1}$ таких слагаемых BC_v , которые представляют собой логическое произведение каждого из слагаемых $BC_i \in BB(E)_{k-1}$ на $BB(e_k)$. Указатель знака $\alpha(BC_v)$ слагаемых BC_v определяется по правилу

$$\alpha(BC_v) = \alpha(BC_i) + 1, i=1, \dots, N(BB)_{k-1}; v = N(BB)_{k-1} + 1, \dots, 2N(BB)_{k-1}.$$

Если $\alpha(BC_v) = 0$, то слагаемое BC_v имеет знак «минус»; $N(BB)_{k-1}$ – число слагаемых в выражении BB на $(k-1)$ -м шаге.

На втором этапе k -го шага в полученном выражении $BB(E)_k$ проверяется существование одинаковых слагаемых $BC_i, BC_v, i=1, \dots, N(BB)_{k-1}$ с противоположными знаками. Поскольку одинаковые слагаемые соответствуют равным числам, они из выражения $BB(E)_k$ исключаются.

После выполнения h шагов вероятность

$$p(E) = \sum_{i=1}^{N(BB)} \alpha(BC_i) p(BC_i),$$

где $p(BC_i)$ – число, представляющее собой произведение исходных вероятностей исправности элементов, входящих в слагаемое $p(BC_i)$.

Логико-вероятностные методы и реализующие их алгоритмы являются достаточно простыми. Однако в сложных системах число слагаемых выражения $BB(E)$ достигает больших величин, что затрудняет их применение для ручного счета. При разработке программного обеспечения логико-вероятностные методы могут быть использованы для расчетов показателей живучести как СПРС, так и систем связи в целом.

Корреляционный метод расчета живучести сети связи. В корреляционном методе применяют итеративный алгоритм расчета, при этом в двухполюсной сети требуется определить вероятность $p(E)$ исправности не менее одного пути при заданных вероятностях $p(e_i)$ исправности элементов. Информация в ДС передается по пути μ_j при условии его исправности и отказе остальных путей рассматриваемого подмножества M_j . В этом случае согласно [1]

$$p(E) = \sum_{j=1}^h p(e_j) p(G_{j-1} | e_j),$$

где $p(e_j)$ – вероятность исправности пути μ_j ;

$p(G_{j-1} | e_j)$ – вероятность отказа остальных путей подмножества при условии исправности пути μ_j .

Исключение корреляции состояний пути μ_i и путей $\mu_l \in M_{j-1}$ осуществляется благодаря использованию формулы условной вероятности для путей μ_i [2]

$$p(e_i | e_j) = p(e_i) / \prod_{\nu \in \pi(\mu_i, \mu_j)} p(e_\nu), \quad (5)$$

где $\pi(\mu_i, \mu_j) = \mu_i \cap \mu_j, I = 1, \dots, j-1$.

Применение соотношения (5) равносильно исключению элементов пути μ_j из состава путей $\mu_l \in M_{j-1}$. Преобразованные таким образом пути называют путями первой итерации. Далее идет последовательное преобразование (итерации) и вычисление условных

вероятностей на каждом шаге. Математические выражения и алгоритмы вычислений наиболее полно представлены в [1].

Объем вычислений при использовании корреляционного метода достаточно высок, однако позволяет получить более точный результат, поэтому используется в программном виде при анализе сложных сетей. Корреляционный метод удобно применять для вычисления условных вероятностей исправности каждого пути и оценки влияния обходных путей на возрастание вероятности $p(E)$.

Метод двудольных графов расчета живучести сети связи. Одним из аналитических методов, позволяющим производить оценку живучести систем и сетей связи, является метод двудольных графов [1]. При этом для ДС задается адекватный ей неориентированный обыкновенный смешанный граф, имеющий оконечные полюса a_s и a_t , множество транзитных вершин (узлов сети) A и ребер (линий между узлами) B . Транзитным вершинам и ребрам графа сети ставятся в соответствие вероятностные показатели их живучести, например вероятности выживания p_i , $p_{i,j}$, в течение интересующего периода функционирования в заданных неблагоприятных условиях. Требуется вычислить вероятность выживания (в течение того же периода) связи между полюсами данной сети по крайней мере по одному каналу. В такой постановке задача эквивалентна оценке связности двухполюсной сети, т. е. нахождению вероятности существованию между полюсами сети хотя бы одной простой цепи – $p(E_j)$.

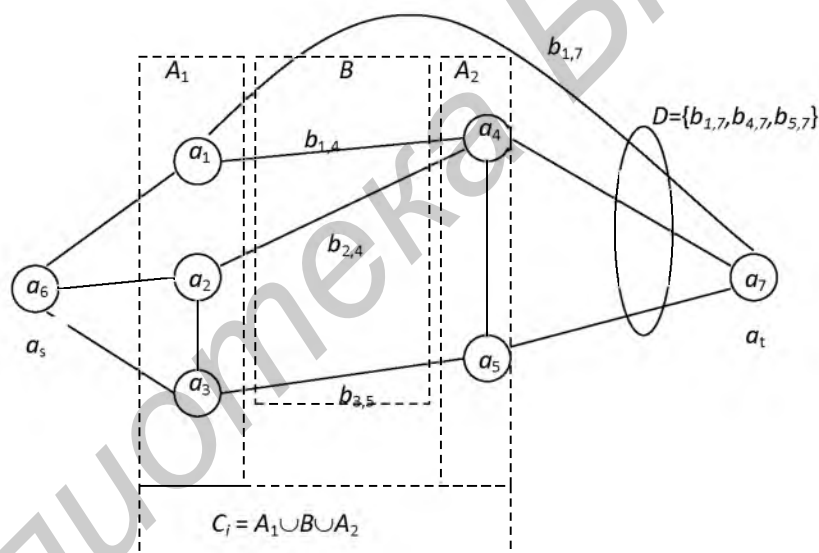


Рисунок 1 – Двудольные графы

Под двудольным графом (ДГ) понимается граф, состоящий из двух непересекающихся подмножеств вершин $A_1 = \{a_i\}$ и $A_2 = \{a_j\}$ и подмножества соединяющих их ребер $B = \{b_{i,j}\}$, выделенный на двухполюсной сети так, что каждое из подмножеств A_1, A_2, B представляет собой простое секущее множество относительно полюсов a_s и a_t . На рисунке 1 представлены двудольные графы (ДГ), сформированные на сети относительно полюсов a_s и a_t .

Если в ДГ есть ребра, связывающие подмножество A_1 непосредственно со вторым полюсом a_t , их исключают из структуры и учитывают отдельно (на рисунке 1 – ребро $b_{1,7}$). Такие ребра называют ребрами непосредственной связи, и из них формируется подмножество D .

В дальнейшем последовательно производится операция «стягивания в одну точку» подмножеств A_1, A_2, B , и получаем так называемый стянутый двудольный граф C_i . При этом образуются последовательно соединенные связывающие звенья. Вероятность исправного

состояния любого из связывающих звеньев n равна произведению вероятностей исправности элементов, входящих в него (вершин и ребер)

$$p(n) = p(b_{i,j})p(a_i) = p_i, p_{i,j},$$

а неисправного – соответственно

$$q(n) = 1 - p(n) = 1 - p(b_{i,j})p(a_i) = p_i, p_{i,j},$$

где $p(n)$ – вероятность исправного состояния связующего звена, $q(n)$ – соответственно неисправного;

p_i – вероятности исправности входящих в связующее звено вершин (узлов);

$p_{i,j}$ – вероятности исправности входящих в связующее звено ребер (линий).

Поскольку по результатам исследований живучести при поражении узла (базовой станции) сети связи одновременно с ним выходят из строя и связи по заходящим в него каналам передачи, то в процессе расчетов они не анализируются, что сокращает расчет.

Подмножество связывающих звеньев данного стянутого ДГ и подмножество ребер непосредственной связи D , сформированное после его построения, образуют i -е простое секущее множество графа сети. В случае повреждения всех элементов этого простого секущего множества разрываются все простые цепи между полюсами сети в данном простом секущем множестве. Вероятность этого события

$$p_{iy} = \prod_{i=1}^D q(b_{i,t}) \prod_{n=1}^m q(n),$$

где p_{iy} – вероятность неисправности i -го простого секущего множества;

$q(b_{i,t})$ – вероятность неисправного состояния множества ребер непосредственной связи;

$q(n)$ – вероятность неисправного состояния множества связывающих звеньев m .

Вероятность p_{iy} является условной, так как i -й стянутый ДГ имеет место лишь при исправном состоянии соответствующего предыдущего стянутого ДГ. Если обозначим вероятность выполнения этого условия $p(\Gamma_v)$, тогда безусловная вероятность разрыва всех связывающих звеньев в i -м стянутом ДГ и ребер непосредственной связи выразится уравнением

$$p_i(G_j) = p(\Gamma_v) \prod_{i=1}^D q(b_{i,t}) \prod_{n=1}^m q(n). \quad (6)$$

Таким образом, если процесс строительства стянутых ДГ начнем с первого (смежного с одним из рассматриваемой пары полюсов) и попутно вычислим $p_1(G_j)$ по (6), затем построим смежный с ним второй стянутый ДГ и вычислим $p_2(G_j)$, потом – третий, смежный со вторым, получив $p_3(G_j)$, и так далее, пока не достигнем второго полюса, то таким способом мы просмотрим и оценим все множество простых секущих множеств между полюсами сети. Сложив все значения $p_i(G_j)$, найдем вероятность $P(G_j)$ неисправного состояния всех простых цепей между полюсами a_s и a_t , т. е.

$$P(G_j) = p_1(G_j) + p_2(G_j) + p_3(G_j) + \dots + p_n(G_j).$$

Соответственно, вероятность $p(E_j)$ противоположного события, заключающегося в существовании не менее одной простой цепи (связи) между полюсами a_s и a_t сети, вычисляется как

$$p(E_j) = 1 - P(G_j).$$

Главное заключается в умении построить процесс последовательного формирования и анализа множества стянутых ДГ между полюсами сети, исключая возможные пропуски отдельных ветвей ДГ, которые приводили бы к погрешностям расчета.

Сущность метода двудольных графов заключается в реализации процесса последовательного формирования по изложенным выше правилам стянутых двудольных графов из всего множества их на сети относительно рассматриваемой пары полюсов, вычисления и суммирования вероятностей их несвязности. При этом также могут вводиться ограничения на число транзитных узлов путем их исключения из рассматриваемого графа при превышении условия.

Анализируя известные методики расчета структурной живучести, изложенные в [4,5], и некоторые другие, можно сделать вывод о том, что общим для них является расчет объектовой живучести элементов сети (узлов, аппаратных, линий связи) на первом этапе. Используемые методы незначительно отличаются, методы расчета живучести площадных целей в статье не рассматривались.

Различие методик оценки живучести в основном обусловлено различием применяемых методов оценки структурной живучести. Наиболее применяемые методы приведены в статье.

Совершенствование методов расчета объектовой живучести направлено на получение более достоверных результатов. В то же время неопределенность некоторых исходных данных не позволяет в настоящее время произвести достаточно полную оценку всех воздействующих факторов на элементы системы связи. Поэтому в некоторых случаях пытаются уйти от неопределенности исходных данных, производя сравнительную оценку вариантов построения систем связи по какому-либо показателю эффективности с учетом живучести системы связи. Так в [6] приведена методика, основывающаяся на использовании вероятностного показателя эффективности системы P_{ε} . Эффективность функционирования системы связи с учетом живучести $P_{\varepsilon,ж}$ определяется как

$$P_{\varepsilon,ж} = P_{\varepsilon} P_{\text{выж.}}$$

Имея данные вероятностные показатели и требуемое минимально допустимое значение эффективности $P_{\varepsilon,доп}$, можно оценить живучесть системы по величине коэффициента живучести, вычисляемого по формуле

$$K_{ж} = \frac{P_{\varepsilon,ж} - P_{\varepsilon,доп}}{P_{\varepsilon} - P_{\varepsilon,доп}}$$

Потенциально-необходимый уровень коэффициента живучести обычно при этом определяется равным 0,7–0,8 (20–30 % запаса живучести) [7]. Показателями эффективности могут выступать показатели пропускной способности [4], вероятностно-временные характеристики систем связи [7,8]. Данные методики относятся к методикам оценки функциональной живучести систем и сетей связи.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что каждый из рассмотренных методов может быть применим для расчета живучести сетей связи, в то же время анализ возможностей и оценка их эффективности свидетельствуют о необходимости выбора метода и алгоритма решения для каждой конкретной задачи. Так, методы перебора состояний путей и логические методы являются достаточно простыми и эффективными, причем использование логических методов позволяет уменьшить количество процедур вычислений. Они могут применяться и при представлении ДС последовательным соединением ее простых сечений. Однако в этом случае усложняется задача определения связности сети. Известны также комбинированные методы, объединяющие несколько принципов. По сравнению с изложенными методами их применение не дает значительных преимуществ по времени получения результатов, но вызывает дополнительные затруднения из-за сложности преобразований исходной структуры. При использовании корреляционного метода усложняется алгоритм расчета, однако в целом значительно уменьшается объем вычислений, особенно для широко разветвленных сетей, при этом повышается точность результата. Однако для ручного счета он вызывает значительные затруднения. Применение метода двудольных графов не вызывает особых затруднений и достаточно эффективно по объему вычислений по сравнению с другими методами. При малой размерности сети может быть использован для ручного счета. По каждому из методов может быть составлен алгоритм для разработки программного обеспечения. При этом с увеличением размерности сети связи по эффективности вычислений их можно расположить в следующем порядке возрастания: метод прямого перебора путей; метод прямого перебора состояний; методы с использованием теоремы разложения; методы с использованием преобразований булевой алгебры;

корреляционный метод; метод двудольных графов. Корреляционный метод удобно применять для оценки живучести многополюсной сети в целом.

Для расчета структурной живучести СПРС в наибольшей степени подходят методы прямого перебора путей, методы с использованием преобразований булевой алгебры, корреляционный метод и метод двудольных графов. Выбор конкретного метода определяется размерностью сети, требуемой точностью значений, возможностями использования программного обеспечения.

Список литературы

1. Надежность и живучесть систем связи / Б. Я. Дудник [и др.]; под ред. Б. Я. Дудника. – М.: Радио и связь, 1984. – 432 с.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 2003. – С. 246–258.
3. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 325 с.
4. Теоретические основы организации связи в соединениях и объединениях. – СПб.: ВАС, 1991. – 306 с.
5. Семашко, Ю. А. Основы организации связи: учеб. пособие / Ю. А. Семашко, С. Г. Голубцов, В. А. Гришко. – Минск: ВА РБ, 2005. – 201 с.
6. Манько, С. А. Оценка живучести системы связи общевойсковое соединения / С. А. Манько. – Материалы VII воен.-науч. конф., Минск, 26–27 янв. 2005 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2005. – С. 123–124.
7. Захаров, Г. П. Оценка живучести систем связи / Г. П. Захаров, В. П. Ревельс. // Спец. техника средств связи. – 1988 – Вып.1. – С. 285–290.
8. Золотев, Л. С. Взгляды на развитие способов ведения общевойсковой операции и боя / Л. С. Золотев // Воен. мысль. – 1998. – № 3. – С. 19–21.
9. Руководство по связи Сухопутных войск (связь в соединениях, воинских частях и подразделениях). – Минск: МО РБ, 2005. – 236 с.
10. Методики по расчету и оценке полевых систем связи. – Л.: ВАС, 1985. – 339 с.
11. Кременецкий, С. Д. Оценка вероятности подавления элемента системы связи при огневом воздействии / С. Д. Кременецкий, А. В. Кожанов // Спец. техника средств связи. – 1989. – Вып. 2. – С. 215–221.
12. Зелинский, Н. И. Методика расчета живучести РЭТ РТВ в условиях ВТО / Н. И. Зелинский // Науч.-метод. материалы. – Вып. 14(342). – 1988. – С. 374–376.
13. Данилевский, Ю. Г. Устойчивость иерархических сетей связи / Ю. Г. Данилевский, Г. П. Захаров // Спец. техника средств связи. – 1984. – Вып. 1. – С. 283–288.
14. Болотов, Э. С. Методика оценки влияния живучести системы на эффективность ее функционирования / Э. С. Болотов [и др.] // Военная радиоэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 19–23.

*Сведения об авторах:

Паскробка Сергей Иванович,

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

Кулешов Юрий Евгеньевич,

УО «Военная академия Республики Беларусь»;

Сергиенко Виктор Аркадьевич,

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

Родионов Андрей Александрович,

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Статья поступила в редакцию 29.05.2014 г.