

**ОЦЕНИВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ИНФОРМАЦИОННО-
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ
К ДЕСТРУКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
НА ОСНОВЕ УЧЕТА СВЯЗНОСТИ
МАРШРУТОВ**

**EVALUATION OF INFORMATION
TELECOMMUNICATION NETWORKS
STABILITY TO DESTRUCTIVE EFFECTS
BASED ON THE CONNECTIVITY
OF ROUTES**

Проанализированы понятие и показатели устойчивости. Изложена проблема оценивания показателей устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей. Рассмотрены основные факторы, нарушающие устойчивость сети. Предложены модель и методика оценивания устойчивости на основе учета вероятности связности маршрутов сети.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная сеть, устойчивость, надежность, живучесть, коэффициент готовности, связность, простая цепь, деструктивные воздействия.

The author of the article analyzes the concept and indicators of stability of the network, discusses the problem of assessing the stability indicators of information telecommunication networks, describes the main factors that violate the stability of the network, and proposes the model and methodology for stability assessment based on the network routes probability of connectivity.

Keywords: information telecommunication network, stability, reliability, survivability, coefficient of availability, connectivity, simple circuit, destructive effects.

Активное внедрение современных информационных технологий и создание единого информационного пространства Вооруженных сил РФ, в том числе в космической сфере [1], на базе информационно-телекоммуникационных сетей (ИТКС) приводит к существенному усложнению архитектуры разрабатываемых автоматизированных систем, повышению рисков программно-технических отказов и информационно-технических воздействий со стороны злоумышленников и, как следствие, – к возрастанию затрат на их сопровождение и защиту. Всё это делает весьма актуальной проблему оценивания и повышения устойчивости функционирования ИТКС военного назначения [2; 3].

ГОСТ 34.003-90 определяет **устойчивость автоматизированной системы управления (АСУ) военного назначения** как комплексное свойство, характеризующее *живучестью, помехоустойчивостью и надежностью* АСУ [4].

В соответствии с ГОСТ Р 53111-2008 [5] **устойчивость функционирования сети элект-**

росвязи представляет собой способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов. При этом дестабилизирующие факторы, воздействующие на сеть, подразделяются на *внутренние* и *внешние*. Соответственно этому свойство сети сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов называют **надежностью сети**, а в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов – **живучестью сети**. Устойчивость же сети представляется как совокупность свойств надежности и живучести.

На рис. 1 отображена взаимосвязь основных состояний сложной системы.

При этом теория надежности оперирует в основном работоспособными и неработоспособными состояниями, в теории живучести важное место занимают *частично работоспособные состояния*, в которых система способна выполнять часть заданных функций в полном или частичном объеме или все заданные функции в частич-

¹ Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры информационно-вычислительных систем и сетей ВКА им. А.Ф. Можайского.

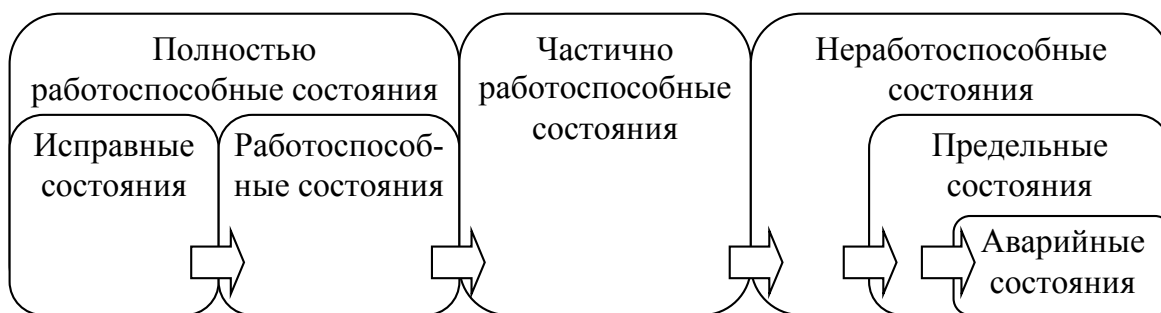


Рис. 1. Основные состояния сложных технических систем

ном объеме. Также в условиях внешних деструктивных воздействий типичны групповые отказы элементов сети.

При функционировании ИТКС в условиях *деструктивных информационно-технических воздействий* (ИТВ) особое значение приобретает такое свойство ИТКС, как *устойчивость к внешним дестабилизирующим факторам, воздействующим на информацию*. В зарубежных источниках [6] *устойчивость информационной системы* (англ. *resilience* – эластичность, упругость, устойчивость) трактуется как способность системы противостоять кибератакам и другим действиям, влияющим на их работоспособность, а также восстанавливать исходное операционное состояние после сбоя в работе, вызванного любым инцидентом.

Основными дестабилизирующими факторами, воздействующими на ИТКС и нарушающими устойчивость их функционирования, являются:

- случайные отказы и сбои сетевого и серверного оборудования;
- невыявленные ошибки программного обеспечения;
- ошибки исходных данных программ;
- некорректные действия пользователей ИТКС;
- стихийные воздействия среды, приводящие к повреждению или уничтожению элементов сети;
- случайные и преднамеренные помехи, приводящие к искажению информации, циркулирующей в ИТКС;
- скачкообразно изменяющийся трафик от абонентов системы;
- воздействие программных вирусов и другого вредоносного кода;
- информационно-технические (программно-аппаратные и радиоэлектронные) воздействия на объекты ИТКС.

Понятие устойчивости относится не к самой системе, а к какому-либо свойству её функционирования. Различные виды возмущающих факторов определяют частные виды устойчивости, поскольку может наблюдаться устойчивость по отношению к одним возмущениям и неустойчивость по отношению к другим возмущениям в смысле какого-либо одного определения устойчивости. В отношении сложной системы можно рассматривать следующие *виды устойчивости* [7]:

- устойчивость к отказам техники (отказоустойчивость);
- устойчивость к ошибкам программ (ошибкоустойчивость);
- устойчивость (стойкость) к внешним климатическим факторам (теплоустойчивость, холодоустойчивость, влагуустойчивость);
- устойчивость к повреждению элементов системы (живучесть);
- устойчивость к механическим воздействиям (удароустойчивость, ударопрочность);
- устойчивость к радиоэлектронным воздействиям – электромагнитным излучениям, наводкам и др. (помехоустойчивость, помехозащищенность);
- устойчивость к программно-аппаратным воздействиям – к сетевым атакам, вредоносным программам (киберустойчивость);
- устойчивость к резкому увеличению трафика, рабочей нагрузки (трафикустойчивость, нагрузоустойчивость).

Модель оценивания устойчивости ИТКС к деструктивным воздействиям, учитывающая как физический, так и информационный характер дестабилизирующих воздействий на систему, будет включать перечисленные внутренние и внешние факторы, воздействующие на ИТКС, а также структуру ИТКС с параметрами элементов сети (рис. 2).

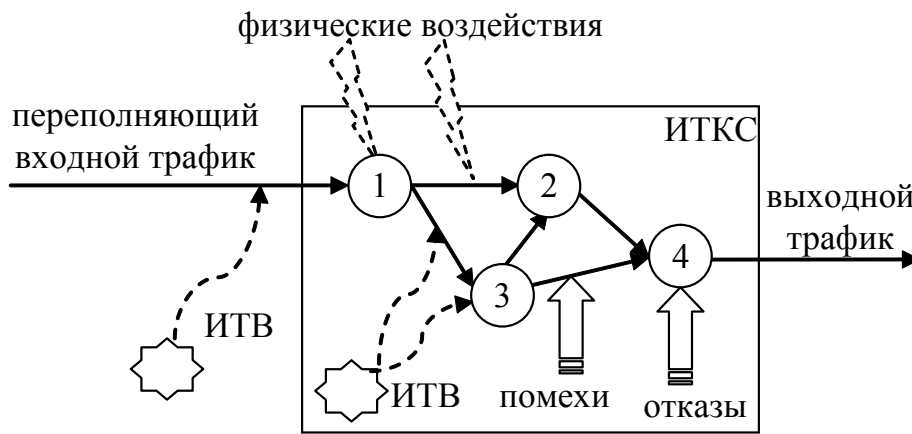


Рис. 2. Модель оценивания устойчивости ИТКС

Для оценивания устойчивости функционирования ИТКС определим основные показатели устойчивости. Надежность и живучесть отдельных элементов сети будем характеризовать коэффициентами готовности и оперативной готовности. Устойчивость сети будем оценивать с помощью вероятности связности маршрута между заданными узлами сети.

Коэффициент готовности является основным показателем, характеризующим надежность функционирования ИТКС и ее элементов (узлов сети и линий связи), и определяется как вероятность того, что сеть (элемент сети) окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени ее функционирования (за исключением времени, в течение которого применение системы по назначению не предусматривается). Коэффициент готовности представляет собой отношение времени исправной работы к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев системы, взятых за один и тот же календарный срок:

$$K_r = \frac{T_{и}}{T_{и} + T_{п}},$$

где $T_{и} = \sum_{i=1}^m T_{ni}$ – суммарное время исправной работы системы;

$T_{п} = \sum_{i=1}^n T_{pi}$ – суммарное время вынужденного простоя.

В этом случае коэффициент готовности показывает долю времени, в течение которого сеть (элемент сети) сохраняла свою работоспособность.

Для перехода к вероятностной трактовке величины $T_{и}$ и $T_{п}$ заменяются математическими

ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно:

$$K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{в}},$$

где $T_{и} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{ni}}{m}$ – среднее время наработки на отказ системы;

$T_{п} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{pi}}{n}$ – среднее время восстановления системы.

В этом случае коэффициент готовности трактуется как вероятность того, что сеть (элемент сети) будет работоспособна в любой произвольно выбранный момент времени.

Устойчивость определенного маршрута между двумя абонентами определяется устойчивостью совокупности составляющих маршрут узлов сети и линий связи, включая оконечные узлы. **Коэффициент оперативной готовности** – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени t_p :

$$K_{op}(t_p) = P(t_p)K_r.$$

Данный показатель позволяет различать системы с одинаковым коэффициентом готовности, но с различным временем непрерывной работы. Коэффициент оперативной готовности будет выше у систем, имеющих большее среднее время наработки на отказ при одинаковых коэффициентах готовности.

Методика оценивания устойчивости функционирования ИТКС основана на использовании случайных графов и нахождении связности между элементами графа с помощью метода перебора простых цепей [5; 8]. Под *простой цепью* понимают последовательность ребер и вершин графа без петель и параллелей, замыкающую полюсы (выбранные вершины) между собой. ИТКС моделируется графом сети, вершинами и ребрами которого являются узлы сети и линии связи. Вершины графа представляют собой узлы сети, а ребра – совокупность линий связи, которые соединяют вершины графа между собой. Всем элементам графа (вершинам и ребрам) присваивают весовые коэффициенты, представляющие собой коэффициенты готовности (оперативной готовности) узла или линии связи при расчете показателей надежности (живучести) сети связи. На построенном графе сети связи выделяют два полюса («исток» и «сток»), которые отмечают выбранное направление связи.

Методика оценивания связности между элементами графа с помощью перебора простых цепей заключается в том, что для выбранных полюсов графа сети отмечаются все пути, по которым может быть установлено соединение. Под событием связности понимают такое событие, когда между «исток» и «сток» в работоспособном состоянии существует хотя бы одна простая цепь. В противном случае наступает событие несвязности. Далее на графе сети выделяют все простые цепи (μ_{ij}) между выделенной парой полюсов (узлов) v_i и v_j сети. При заданных коэффициентах готовности/оперативной готовности для всех элементов графа связность двухполюсной сети между выделенными узлами v_i и v_j рассчитывается методом объединения простых цепей с учетом эффекта поглощения.

При практических расчетах перечень простых цепей или путей μ_{ij}^k между узлами v_i и v_j ограничивают только теми путями, которые содержат допустимое число транзитных участков, зависящее от допустимого уровня искажений передаваемой по линии связи информации. Число транзитных участков определяет ранг простых цепей – r_{\max} . Таким образом, полный перечень простых цепей между узлами связи определяется с учетом максимально допустимого числа транзитных участков (ограничения ранга простых цепей).

Связностью p_{ij}^k k -го пути μ_{ij}^k из перечня всех цепей μ_{ij} называется совместная вероятность исправного состояния всех ребер и вершин, образующих эту цепь:

$$p_{ij}^k = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} (1 - q_a) = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} p_a, \quad (1)$$

где $q_a = 1 - p_a$ – коэффициент неготовности (или оперативной неготовности) a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащего пути μ_{ij}^k (при проведении реальных расчетов этим коэффициентом пользоваться удобнее, чем коэффициентом p_a);

p_a – коэффициент готовности (или оперативной готовности) a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути μ_{ij}^k .

Вероятность связности p_{ij} от v_i к v_j – это вероятность исправного состояния хотя бы одной цепи из всех возможных цепей или (при ограничении числа транзитных участков r_{\max}) хотя бы одной цепи с допустимым рангом:

$$p_{ij} = p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k). \quad (2)$$

Из-за наличия общих ребер и вершин в цепях вероятность связности, вычисленная по формуле (2), имеет завышенное значение. Для расчета действительного значения необходимо исключить события многократного учета коэффициента готовности/оперативной готовности одного ребра или одной вершины. Для этого необходимо выполнить операцию поглощения E (т.е. замену после раскрытия скобок всех членов, имеющих показатели степени больше единицы, на единицу). Формула для вычисления связности принимает вид:

$$p_{ij} = E \left\{ p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k) \right\}. \quad (3)$$

Число перемножаемых сомножителей в формулах (2) и (3) равно числу простых цепей, а число перемножаемых сомножителей в формуле (1) равно числу ребер и вершин в одной цепи. Таким образом, показатели надежности и живучести сети (по вероятностям связности двухполюсного графа) вычисляют по формуле (3). Аналогично исключение дублирования элементов сети при расчете связности выполняется на основе *логики-вероятностных методов* [9].

Пример. Определим пути из вершины 1 в вершину 5 (рис. 3).

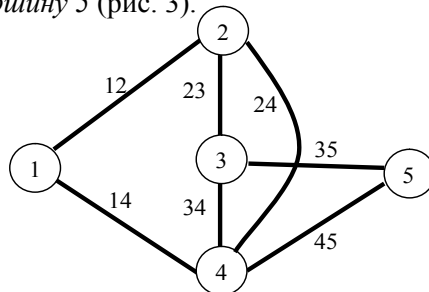


Рис. 3. Пример сетевой модели ИТКС

- 1 путь. 1-2-3-5, $r = 3$ 5 путь. 1-4-5, $r = 2$
 2 путь. 1-2-4-5, $r = 3$ 6 путь. 1-4-3-5, $r = 3$
 3 путь. 1-2-4-3-5, $r = 4$ 7 путь. 1-4-2-3-5, $r = 4$
 4 путь. 1-2-3-4-5, $r = 4$

Число транзитных участков определяет ранг простых цепей – $r_{max} = 3$.

Тогда пути 3, 4 и 7 исключаются. Вероятности связности оставшихся цепей (рис. 4) представлены ниже.

$$p_{15}^1 = K_r^1 \cdot K_r^{12} \cdot K_r^2 \cdot K_r^{23} \cdot K_r^3 \cdot K_r^{35} \cdot K_r^5;$$

$$p_{15}^2 = K_r^1 \cdot K_r^{12} \cdot K_r^2 \cdot K_r^{24} \cdot K_r^4 \cdot K_r^{45} \cdot K_r^5;$$

$$p_{15}^5 = K_r^1 \cdot K_r^{14} \cdot K_r^4 \cdot K_r^{45} \cdot K_r^5;$$

$$p_{15}^6 = K_r^1 \cdot K_r^{14} \cdot K_r^4 \cdot K_r^{43} \cdot K_r^3 \cdot K_r^{35} \cdot K_r^5.$$

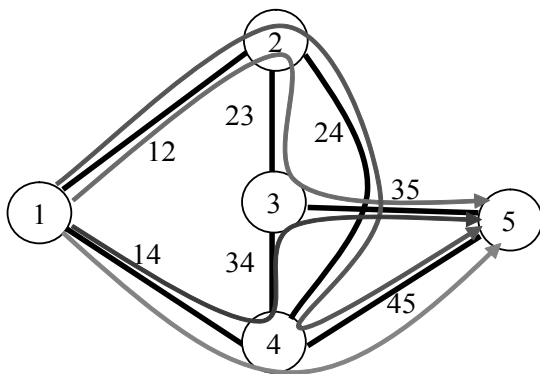


Рис. 4. Пример сетевой модели ИТКС

Затем рассчитываем вероятность связности маршрута из первого узла в пятый – p_{15} :

$$p_{15} = E \{ p_{15}^{max} = 1 - (1 - p_{15}^1) \cdot (1 - p_{15}^2) \cdot (1 - p_{15}^5) \cdot (1 - p_{15}^6) \}.$$

При коэффициентах готовности узлов и линий связи данной сети $K_r = 0,99$ получим значение показателя устойчивости $p_{15} = 0,9792$. При условии абсолютной надежности (отказоустойчивости, живучести) узлов сети ($K_r^i = 1$) получим $p_{15} = 0,9998$. При условии абсолютной надежности (помехоустойчивости, живучести) линий связи между узлами сети ($K_r^{ij} = 1$) получим $p_{15} = 0,9799$. Таким образом, данный маршрут более чувствителен к готовности узлов.

Для оценивания и сравнительного анализа показателей устойчивости сетевых структур расчет проводится в трех различных режимах с выходом из строя выбранных элементов сети и последующим выявлением ее узких мест:

1) расчет показателей устойчивости для исходной структуры;

2) расчет показателей устойчивости в условиях одиночных отказов узлов и связей между ними (режим надежности);

3) расчет показателей устойчивости в условиях групповых отказов узлов и связей между ними (режим живучести).

Коэффициенты готовности отказавших элементов сети приравниваются к нулю. Данная методика может быть также использована при реконfigurировании сети за счет резервных узлов и связей.

Литература

1. Гладышев А.И. Вопросы создания единого информационного пространства в космотехносфере // Вестник Российского нового университета. – 2014. – № 4. – С. 137–140.

2. Гончаренко В.А. Методы обеспечения устойчивости функционирования распределенных информационно-вычислительных систем // Проблемные вопросы сбора, обработки, передачи и защиты информации в сложных радиотехнических системах : тематический науч.-тех. сборник. – МО РФ : ПВИРЭ КВ, 2005. – № 24. – С. 102–106.

3. Гончаренко В.А., Швец Т.С. Методика оценивания устойчивости функционирования критически важных объектов к программно-аппаратным воздействиям // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности : сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. 30 апреля 2014 г. : в 11 ч. – Тамбов : ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – Ч. 8. – С. 34–35.

4. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2009. – 24 с.

5. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего назначения. Требования и методы проверки. – М. : Стандартинформ, 2009. – 19 с.

6. ANSSI. Information systems defence and security // France's strategy. – № 6. – 2011. – Feb. – 24 p.

7. Эксплуатация средств вычислительной техники. Часть 1. Аппаратные средства вычислительной техники : учебник / А.В. Аверьянов, А.Г. Басыров, В.А. Гончаренко [и др.] / под ред. Г.В. Кремеца. – СПб. : ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 505 с.

8. Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов [и др.] / под ред. Б.Я. Дудника. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.

9. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб. : Изд-во СПб ун-та, 2007. – 276 с.