

УДК 621.38:004.03

А.В. ХАРЫБИН

Полтавский военный институт связи, Украина

МЕТОД ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

В статье предложен и рассмотрен точный метод оценки живучести распределенных информационно-управляющих систем, который позволяет учесть кратность воздействий экстремальных факторов и критичность входящих в их состав элементов на различных этапах жизненного цикла.

распределенная информационно-управляющая система, метод оценки живучести, анализ критичности отказов, кратность критичности элемента, показатель живучести.

Постановка проблемы в общем виде и обзор публикаций

Современные информационно-управляющие системы (ИУС) представлены сложными гетерогенными информационно-коммуникационными сетями построенными на основе интеграции компьютерных и телекоммуникационных систем. ИУС, используемые для управления в критических системах (проектах и процессах) относят к классу систем критического применения. К таким ИУС предъявляются высокие требования по надежности и живучести функционирования в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов. Для удовлетворения этих требований разработчики прибегают к введению различных видов избыточности в ИУС, а для обеспечения живучести ИУС и к территориальному распределению её элементов [1 – 8]. Такие системы относят к классу распределенных ИУС (РИУС).

Для оценки указанных свойств РИУС используется множество методов оценки [1 – 4, 6, 9 – 12], подавляющее большинство которых основаны на двух часто принимаемых допущениях:

➤ единичные показатели живучести (вероятности выживания) элементов, выполняющих однотипные задачи (вычислительно-коммутиционных узлов и/или линий передачи информации между ними), принимаются равными;

➤ с целью упрощения математического аппарата методов оценки и задачи его программной реализации «вклад» в обеспечение живучести системы для всех составляющих её элементов принимается равным, вне зависимости от степени их критичности для функционирования ИУС в целом и выполнения наиболее ответственных (основных) функций в условиях воздействия экстремальных факторов.

Первое допущение может быть выполнено при условии однотипности программно-аппаратных средств, функционирующих в узлах ИУС, а также однородности линий передачи информации (в т. ч. среды распространения сигналов) между ними. Это условие выполнимо только в простых по функциям и архитектуре территориально-сосредоточенных (локальных) ИУС.

Второе допущение не соответствует требованиям к анализу живучести современных РИУС критического применения, а следовательно при оценке данного свойства не должно приниматься.

В работах [2, 5 – 12] предлагаются подходы к оценке живучести ИУС, учитывающие критичность их отдельных функций и структурных элементов, но они имеют следующие недостатки:

○ отсутствие четких правил определения количественных значений показателя работоспособности отдельного элемента (функции, процесса) ИУС при частично-работоспособном его состоянии;

о существует возможность получения отрицательных по абсолютному значению детерминированных оценок живучести ИУС (для ИУС опасных критических объектов) [5-6].

В работах [3, 4] обоснована необходимость получения точных оценок живучести ИУС на различных этапах её жизненного цикла, что требует применения различных методов моделирования процесса функционирования данных систем, основанных на переборе возможных состояний, с учетом статистики воздействия экстремальных факторов (ЭФ).

Следовательно, для проведения точной оценки живучести современных РИУС необходимо использовать метод, в котором будет решена задача учета следующих особенностей:

- различность степеней критичности отдельных элементов для обеспечения работоспособности РИУС в целом;
- неравенство единичных показателей живучести различных элементов РИУС;
- результирующий показатель живучести должен иметь положительное и ограниченное определенным интервалом количественное значение;
- метод оценки и используемые в нем показатели должны позволять проводить сравнительный анализ живучести кардинально разных по архитектурно-структурному построению РИУС, выполняющих однотипные функции в одинаковых экстремальных условиях эксплуатации (ЭУЭ).

Целью данной статьи является представление результатов разработки метода оценки живучести РИУС, учитывающего указанные особенности.

Метод оценки живучести РИУС

Под *живучестью ИУС* понимается свойство выполнять хотя бы основные (критичные) функции с качественными характеристиками не ниже минимально-допустимых в ЭУЭ. Для решения поставленной задачи был проведен анализ существующих методов оценки живучести ИУС и подобных им

систем (в т. ч. информационно-коммуникационных); единичных и комплексных показателей оценки указанного свойства ИУС и отдельных её элементов; подходов к оценке критичности функций и элементов ИУС. В результате проведенных исследований был предложен новый метод оценки живучести РИУС включающий в себя следующие элементы и процедуры:

1. Синтез модели РИУС.
2. Анализ критичности отдельных элементов модели РИУС.
3. Оценка живучести ИУС, с учётом её распределённости и критичности отдельных функциональных элементов.

Рассмотрим подробнее предлагаемый метод оценки живучести РИУС.

1. Моделирование РИУС

Структурно-топологическое построение РИУС задается графом $G(a,b)$, вершинам a которого соответствуют вычислительно-коммуникационные узлы, а ребрам b – линии передачи информации между ними. Граф $G(a,b)$ описывается квадратной матрицей связности $H_{CB}(c)$ множества C элементов РИУС, а также одномерным массивом $M_{Ж}(c)$ единичных показателей живучести всех элементов РИУС, значения которых определяются статистически либо с помощью вероятностных методов оценки объектовой живучести для заданных ЭУЭ. Элементы h_i матрицы связности $H_{CB}(c)$ равны 1 если пересекающиеся на них строки и столбцы соответствуют структурным элементам, имеющим соединение между собой, и равны 0 – в противном случае.

2. Методика анализа критичности отдельных элементов РИУС

Данная методика основана на требованиях по проведению анализа критичности отказов элементов сложных систем, изложенных в [13] и содержит в

своём составе четыре основных этапа, два из которых (первый и третий) аналогичны рассмотренным в работах [6, 8].

В общем случае для рассматриваемого класса ИУС возможно три основных вида отказов их элементов множества $S(a,b)$:

1) отказы, не влияющие на выполнение критичной функции подсистемой РИУС или ИИУС в целом;

2) отказы, приводящие к ухудшению точностных и/или временных характеристик выполнения критичной функции подсистемой, но не приводящие к критическому состоянию самой РИУС или к критическим (катастрофическим) последствиям объекта управления – отказы, приводящие к частично работоспособному состоянию;

3) отказы, приводящие к критическому состоянию функциональную подсистему РИУС (при этом неизбежен значительный ущерб для системы в целом и/или объекта управления).

На первом этапе производится анализ критичности множества функций F выполняемых системой, с параллельным разложением графа РИУС на частные подграфы отдельных подсистем, выполняющих критичные функции (КрФ) РИУС. На втором этапе каждая из данных КрФ подвергается разложению на множество простых задач (процессов), выполнение которых обуславливает нормальное функционирование соответствующей подсистемы РИУС. Третий этап анализа заключается в определении кратности использования отдельных элементов подсистем РИУС в решении критичных задач (КрЗ), обеспечивающих выполнение соответствующих КрФ. На четвертом этапе проводят расчет нормированного показателя кратности критичности для каждого из элементов подсистем РИУС.

Рассмотрим подробнее методику анализа критичности отдельных элементов (АКОЭ) РИУС.

Как уже было отмечено, на первом этапе анализа критичности элементов РИУС из множества функций F , возложенных на неё в нормальных условиях

эксплуатации (НУЭ), выделяют группу КрФ – F^* , нарушение выполнения которых может привести к критическим состояниям системы. Таким образом формируется группа из i функций для данной РИУС, выполнение которых должно обеспечиваться даже в ЭУЭ. Качественные характеристики выполнения этих КрФ будут определяющими для свойства живучести системы. Далее для каждой из КрФ f_n^* ($n = 1, \dots, i$) формируется собственный подграф $G(a, b)$, содержащий все элементы, которые участвуют (могут участвовать) в её реализации, путем разбиения графа $G(a, b)$. Подграфы $G(a, b)$ имеют, как правило, иерархическую структуру, отображающую взаимосвязь управляющего и управляемых элементов подсистемы. Для каждого из подграфов G формируются массивы $M_n(c_k)$ входящих в них элементов и одномерные массивы $M_{Ж_n}(p_{cl})$ соответствующих им показателей живучести.

Вторым этапом является процедура формирования множеств Z_n частных задач z_{nj} ($j = 1, \dots, e$) по приему, хранению, обработке и выдаче информационных и управляющих сообщений (команд, сигналов), выполняемых группами элементов и/или отдельными элементами, входящими в подграф G данной КрФ. Таким образом на втором этапе формируется i групп КрЗ, облегчающих дальнейшее определение множества критичных элементов РИУС. Результаты определения множества КрЗ заносятся в i одномерных массивов Mz_n .

На третьем этапе проводится анализ критичности отдельных элементов c_k ($k = 1, \dots, g$) каждой из функциональных подсистем РИУС. При этом для каждого из i подграфов G формируются матрицы критичности $M_{КрФ}(z_{nj}, c_k)$ элементов c_k входящих в их состав.

Элементы данных матриц m_{jk} на пересечении строк, соответствующих определенным КрЗ z_{nj} , со столбцами, соответствующими элементам c_k анализируемого подграфа, заполняются числовыми значениями в соответствии со следующими правилами:

1) если отказ элемента c_k для данной КрЗ z_{nj} относится к виду 1 – то значение элемента m_{jk} матрицы $M_{КрП}(z_{nj}, c_k)$ равно 0;

2) если отказ элемента c_k для данной КрЗ z_{nj} относится к виду 2 – то значение элемента m_{jk} матрицы $M_{КрП}(z_{nj}, c_k)$ равно 0,5;

3) если отказ элемента c_k для данной КрЗ z_{nj} относится к виду 3 – то элемент m_{jk} матрицы $M_{КрП}(z_{nj}, c_k)$ принимает значение 1;

4) если для выполнения данной КрЗ z_{nj} используются d параллельно включенных однотипных структурных элементов c_k , входящих в анализируемый подграф G_n , то соответствующий элемент m_{jk} матрицы $M_{КрП}(z_{nj}, c_k)$ примет значение в d раз меньшее значения, определяемого по правилам 1-3.

Четвертым этапом анализа является определение количественного значения показателя кратности критичности – v_k для всех структурных элементов c_k каждой из i функциональных подсистем РИУС. Определение количественного значения v_k проводится в четыре действия:

1) определение абсолютного значения величины критичности $m_{\Sigma k}$ элемента c_k n -й подсистемы РИУС путём суммирования значений всех элементов m_{jk} k -го столбца матрицы критичности $M_{КрП}(z_{nj}, c_k)$;

2) определение суммарного значения критичности $m_{\Sigma n}$ всех элементов c_k n -й подсистемы РИУС путём суммирования значений $m_{\Sigma k}$ всех элементов c_k , образующих эту подсистему;

3) определение нормированного значения величины критичности $\{m_{\Sigma k}\}$ для каждого элемента c_k n -й подсистемы РИУС согласно выражению

$$\{m_{\Sigma k}\} = \frac{m_{\Sigma k}}{m_{\Sigma n}}; \quad (1)$$

4) расчет значения показателя v_k по формуле:

$$v_k = \frac{1}{\{m_{\Sigma k}\}}. \quad (2)$$

Результатом проведения АКОЭ РИУС в соответствии с предложенной методикой будет i одномерных массивов $V_n(c_k)$, содержащих значения показателя

кратности критичности v_k всех g элементов критичных подсистем РИУС.

3. Оценка живучести РИУС

Для оценки живучести РИУС в целом необходимо произвести оценку живучести множества i критичных подсистем с учетом критичности их отдельных элементов. Как уже было отмечено, практически все подсистемы РИУС будут иметь иерархическую структуру. Поэтому при оценке их живучести в новом методе предлагается использовать, как уже известные в литературе [2, 3, 6, 9 – 12] подходы (детерминированную оценку и имитационную модель оценки структурной живучести иерархических ИУС), так и математический аппарат, учитывающий новый показатель – кратность критичности элементов, обеспечивающих функционирование живучесть определяющих подсистем.

В рассматриваемом методе оценки принято, что РИУС в целом обладает живучестью если все i критичных подсистем имеют минимально-допустимый уровень живучести (условие 1).

В свою очередь критичная подсистема обладает минимально-допустимым уровнем живучести (остается частично работоспособной в ЭУЭ), если вычислительно-коммуникационный узел верхнего яруса управления (автоматизированное рабочее место или центральный вычислитель) имеет возможность обмена информацией хотя бы с одним узлом нижнего яруса управления (исполнительным механизмом, приёмником подаваемой в контур управления информации или датчиком) данной подсистемы (условие 2).

В основу оценки живучести положен принцип полного перебора состояний функционирования РИУС в ЭУЭ, что обуславливает относительно высокие затраты времени и вычислительных ресурсов для проведения оценки и высокую точность получаемых оценок.

Для количественной оценки живучести n -той критичной подсистемы РИУС предлагается использовать минимальное и среднее значения комплексного показателя S_n (от английского «survivability»), определяемого, как показатель живучести, учитывающий её структуру и кратность критичности отдельных элементов, входящих в подсистему.

Для расчета минимального значения комплексного показателя живучести (S_{nMIN}) n -й подсистемы РИУС при кратности воздействий ЭФ l используется выражение:

$$S_{nMIN}^l = \min_Y \left\{ \prod_{k=1}^g \left[p_B[M_{B_y}(c_k)] \times \left(1 - p_B[M_n(c_k) - M_{B_y}(c_k)] \right) \right] \times K_y \cdot \sum_{M_{B_y}(c_k)} v_k \right\}, \quad (3)$$

где Y – множество возможных состояний подсистемы из g элементов при l воздействиях ЭФ:

$$Y = C_l^g = \frac{g!}{l!(g-l)!}; \quad (4)$$

K_y – показатель качества функционирования подсистемы в y -м состоянии, определяемый из выражения:

$$K_y = \frac{u_y}{U}, \quad (5)$$

где u_y – количество нормально функционирующих узлов нижнего яруса иерархической структуры подсистемы РИУС имеющих возможность обмена информацией с управляющим узлом верхнего яруса в y -м состоянии; U – общее количество узлов нижнего яруса иерархической структуры данной подсистемы РИУС; $p_B[M_{B_y}(c_k)]$ – вероятность выживания элемента c_k множества $M_{B_y}(c_k)$ – выживших элементов в состоянии y подсистемы; $p_B[M_n(c_k) - M_{B_y}(c_k)]$ – вероятность выживания элемента c_k из множества элементов $M_n(c_k)$ данной n -й подсистемы погибших в рассматриваемом y -м состоянии (не вошедших в $M_{B_y}(c_k)$); v_k – кратность критичности элемента c_k для данной подсистемы РИУС.

Для расчета среднего значения комплексного показателя живучести \bar{S}_n n -й подсистемы РИУС при кратности l воздействий ЭФ используется выражение:

$$\bar{S}_n^l = \frac{\sum_{y=1}^Y \left(\prod_{k=1}^g \left[p_B[M_{B_y}(c_k)] \times \left(1 - p_B[M_n(c_k) - M_{B_y}(c_k)] \right) \right] \times K_y \cdot \sum_{M_{B_y}(c_k)} v_k \right)}{Y}. \quad (6)$$

Физический смысл предложенного показателя близок к функции живучести, так как с его помощью можно проследить изменения живучести от количества воздействий ЭФ.

Для анализа живучести РИКС в целом целесообразно использовать множество наименьших значений показателя S_{nMIN} , и усредненных значений показателей \bar{S}_n , определяемых для полного множества критичных подсистем при заданных значениях кратности l воздействия ЭФ.

Выводы

Предложен новый точный метод оценки живучести РИКС и соответствующий ему комплексный показатель живучести, позволяющие учесть при оценке территориальную распределенность, структурную сложность, кратность воздействий ЭФ и функциональную критичность отдельных элементов распределенных информационно-управляющих систем. Поэтому он может быть использован при создании инструментальных средств и информационной технологии поддержки принятия решения по обеспечению заданного уровня живучести РИКС на различных этапах их жизненного цикла.

Формируемое в результате оценки множество показателей живучести позволяет производить анализ живучести и обоснованный выбор наилучшего архитектурно-структурного варианта построения (реконфигурации) РИКС и их критичных подсистем.

Литература

1. Надежность и живучесть систем связи / Под ред. Б.Я.Дудника. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
2. Харченко В.С., Марков П.Е. Живучесть и безопасность систем управления летательных комплексов. Ч. 1. Основные понятия и модели. – Харьков: МО Украины, 1995. – 109 с.
3. Одарущенко О.Н., Харьбин А.В. Анализ моделей и методов оценки структурной живучести телекоммуникационных сетей критического применения // Зб. наук. праць «Авіаційно-космічна техніка і технологія». – Х.: НАКУ «ХАІ». – 2002. – Вип.35. – С. 192–195.
4. Харьбин А.В., Одарущенко О.Н. О подходе к решению задачи выбора методологии оценки структурной надежности и живучести информационных сетей критического применения // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6. – С. 61-70.
5. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Формализованное представление номинальной функциональной структуры для анализа живучести бортовых информационно-управляющих систем // Моделирование та інформаційні технології: Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. – 2004. – Вип. 26. – С. 206-212.
6. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Моделирование и анализ живучести бортовых информационно-управляющих систем по избыточной функциональной структуре // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 2. – С. 89-95.
7. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Использование сетей Петри при проведении анализа живучести бортовых информационно-управляющих систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6. – С. 55-60.
8. Тимофеев О.С. Оценка критичности и корреляции функций бортовых информационно-управляющих систем при анализе потенциальной живучести // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 7. – С. 111-114.
9. Харьбин А.В., Одарущенко О.Н. Модель оценки структурной живучести многоуровневых информационных систем // Зб. наук. праць Першої міжнародної наукової конференції студентів та молодих учених “Управління розвитком соціально-економічних систем: глобалізація, підприємництво, стає економічне зростання”. Ч. 3. – Донецьк: ДОНУ, 2001. – С. 40-43.
10. Батуков А.П., Складар В.В. Оценка живучести управляющих систем при биномиальном распределении вероятности поражения их элементов // Электронное моделирование. – 2001. – Т. 23, № 6. – С. 92-101.
11. Гагин А.А., Климовский О.В. Методы определения живучести сложных систем при многократных точечных внешних воздействиях // Электронное моделирование. – 1990. – Т. 12, № 4. – С. 37-43.
12. Харченко В.С., Лысенко И.В., Мельников В.А. Оценка и обеспечение живучести информационно-вычислительных и управляющих систем технических комплексов критического использования // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 1. – С. 64-80.
13. ГОСТ 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения: [введен 1997-01-01] – М.: Издательство стандартов, 1996. – 12 с. [Межгосударственный стандарт].

Поступила в редакцию 23.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.