

УДК 004.519.217

В.С. ХАРЧЕНКО¹, О.Н. ОДАРУЩЕНКО², А.А. РУДЕНКО², Е.Б. ОДАРУЩЕНКО³,
Ю.Л. ПОНОЧОВНИЙ³

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ“, Украина

²Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,
Полтава, Украина

³Военный институт телекоммуникаций и информатизации национального
технического университета Украины „КПИ“, Полтава, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАЕМЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ВТОРИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

В статье анализируются допущения, принятые в моделях надежности программных средств. Предлагается подход к разработке моделей обслуживаемых компьютерных систем, в которых учитываются возможности внесения новых (вторичных) дефектов в процессе устранения обнаруженных ранее (первичных) дефектов проектирования ПС. Описываются базовые макромоделли в терминах многофрагментных марковских моделей обслуживаемых компьютерных систем и анализируются соответствующие им функции готовности.

Ключевые слова: обслуживаемая компьютерная система, надежность программных средств, дефект проектирования, внесение дефектов, базовые многофрагментные макромоделли, модель Мусы.

Введение

Анализ функционирования компьютерных систем [1, 2] показывает, что их отказы обусловлены возникновением (проявлением) следующих групп дефектов: физических дефектов (ДФ) аппаратных средств (АС); проектных дефектов (ДП) программных и аппаратных средств; дефектов взаимодействия (ДВ), которые вызываются случайными непредумышленными или предумышленными внешними воздействиями физической природы или информационными воздействиями. Влияние ДП программных средств (ПС) на работоспособность для многих типов систем является доминирующим [3].

Ряд публикаций посвящено вопросам разработки и анализа моделей оценки надежности ПС [4-6], в [7] предложен метод их выбора. Эффект устранения проявляющихся ДП ПС, влияющий на показатель готовности обслуживаемых компьютерных систем (ОКС), учтен посредством использования многофрагментных марковских моделей [8].

Опыт применения сложных программных продуктов показывает, что в процессе применения ОКС в их ПС вносятся корректировки, что также изменяет их показатель надежности [9]. Однако, в известных моделях не учитывается в явном виде тот факт, что в ходе устранения ДП ПС (первичных дефектов) могут быть внесены новые (вторичные) дефекты, хотя по некоторым данным и оценкам экспертов доля вносимых де-

фектов может составлять до 35-40 процентов от устраняемых ДП ПС [10, 11].

Общим допущением известных моделей надежности ПС Джелинского-Моранды, Шика-Уолвертона является то, что ошибки (дефекты) корректируются без внесения в программное обеспечение (ПО) новых [4, 5]. В моделях Липова, Шнейдевинда, Дюэна, а также модели, основанной на законе распределения Вейбулла и других, этот аспект не рассматривается вообще.

Цель данной статьи – разработать базовые сценарии и модели надежности ОКС с учетом внесения вторичных дефектов в ходе устранения первичных ДП ПС, обнаруженных при тестировании или функционировании.

1. Сценарии внесения дефектов при устранении ДП ПС

В случае исключения допущения о том, что вторичные ДП ПС в ходе устранения первичных не вносятся, множество возможных сценариев описывается соотношением:

$$M_i = \begin{cases} N_{\Sigma} - N_i, \\ N_{\Sigma} - N_i + K_i, \\ N_{\Sigma} - N_i + \Delta N_i, \\ N_{\Sigma} - N_i + K_i + \Delta N_i, \end{cases} \quad (1)$$

где M_i – число дефектов после i -той операции по устранению выявленных дефектов;

N_{Σ} – число дефектов в исходной программе;

N_i – число обнаруженных дефектов;

K_i – число дефектов, внесенных в процессе устранения обнаруженных дефектов;

ΔN_i – число неустраненных дефектов (из числа выявленных).

Первой строке выражения (1) соответствует сценарий полного устранения обнаруженных первичных дефектов без внесения вторичных, второй – сценарий полного устранения обнаруженных первичных дефектов и внесения вторичных, третьей – сценарий частичного устранения обнаруженных первичных дефектов, четвертой – состояние частичного устранения обнаруженных первичных дефектов и внесения вторичных. При этом возможны случаи:

$$N_i > K_i \quad (2)$$

$$N_i = K_i \quad (3)$$

$$N_i < K_i \quad (4)$$

Очевидно, что всегда справедливо: $\Delta N < N_i$. В большинстве работ [4-6, 8, 9] в качестве параметра, определяющего надежность ПС, принят параметр $\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$ – интенсивность проявления дефектов.

Выражение для интенсивности проявления ДП ПС в соответствии с вероятностной моделью Дж.Д. Мусы [6], имеет вид:

$$\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \left[T_i \cdot \exp \left(\frac{K_i \cdot t_{\text{тест}}}{N_{\Sigma} \cdot T_i} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где T_i – средняя наработка на отказ в начале испытаний;

$t_{\text{тест}}$ – длительность тестирования и отладки;

K_M – коэффициент, который учитывает „уплотнение“ времени тестирования и отладки по отношению к реальному времени функционирования ОКС.

Из (5) следует, что с увеличением параметра N_{Σ} увеличивается $\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$ и наоборот.

Таким образом, реализацию сценариев (1), учитывая (2), (3), (4) соответственно, можно представить следующим образом:

$$\lambda_{\bar{a}\bar{i}+1} = \begin{cases} \lambda_{\bar{a}\bar{i}} - \Delta\lambda 1, \\ \lambda_{\bar{a}\bar{i}}, \\ \lambda_{\bar{a}\bar{i}} + \Delta\lambda 2, \end{cases} \quad (6)$$

где $\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$, $\lambda_{\bar{a}\bar{i}+1}$ – интенсивность проявления ДП ПС соответственно на i -м и $i+1$ -м шаге до и после устранения ДП ПС;

$\Delta\lambda 1$ и $\Delta\lambda 2$ – величины изменения интенсивности проявления ДП ПС, характеризующие изменение безотказности ПС при позитивном

($M_i > M_{i+1}$) и негативном ($M_i < M_{i+1}$) сценариях соответственно и зависящие от значений N_{Σ} , N_i , K_i , ΔN_i .

2. Базовые макромоделли надежности ОКС

Оценка надежности ОКС осуществляется на основе математических моделей, учитывающих параметры надежности АС, ПС, а также, параметры внешних физических и информационных воздействий [2]:

– параметры АС: $\lambda_{\bar{a}\bar{o}}$ – интенсивность возникновения ДФ АС; $\mu_{\bar{a}\bar{o}}$ – интенсивность восстановления отказов вследствие ДФ АС;

– параметры ПС: $\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$ – интенсивность проявления ДП ПС; $\mu_{\bar{a}\bar{i}}$ – интенсивность восстановления отказов вследствие ДП ПС;

$\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i}$ – изменение интенсивности за счет внесения вторичных дефектов в процессе восстановления после проявления ДП ПС; $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}n}$ – изменение интенсивности за счет устранения дефектов в процессе восстановления; $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$ – суммарное изменение интенсивности проявления ДП ПС ($\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}n} - \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i}$);

– параметры физических и информационных воздействий: $\lambda_{\bar{a}\bar{a}}$ – интенсивность появления ДВ; $\mu_{\bar{a}\bar{a}}$ – интенсивность восстановления после отказов вследствие ДВ.

Существует множество вариантов, которое можно получить в результате перебора комбинаций рассматриваемых параметров и соответствующих им стратегий построения базовых макромоделли (БМ) оценки надежности ОКС [8]. Исходя из этого, разработано множество макрографов БМ, описывающих функционирование ОКС с учетом одного из вариантов изменения параметров.

Рассмотрим некоторые из них.

1) БМ1 характеризуется следующей комбинацией параметров:

– интенсивность проявления ДП ПС $\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \text{const}$;

– изменение интенсивности проявления ДП ПС $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = 0$ (дефекты не устраняются и не вносятся);

– интенсивность восстановления после проявления ДП ПС $\mu_{\bar{a}\bar{i}} = \text{const}$;

– интенсивность проявления ДВ $\lambda_{\bar{a}\bar{a}} = \text{const}$;

– интенсивность восстановления после проявления ДВ $\mu_{\bar{a}\bar{a}} = \text{const}$.

Такому случаю соответствует равенство параметров $\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$ исходного и внутреннего фрагментов. С учетом выражения (5) граф состоит из фиксиро-

ванного набору функціональних состояний и является однофрагментным.

2) БМ2 отличается от БМ1 тем, что интенсивность проявления ДП ПС $\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \text{var}$, а величина изменения интенсивности проявления ДП ПС $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \text{const}$, т.е. $\lambda_{\bar{a}\bar{i}i+1} = \lambda_{\bar{a}\bar{i}i} - \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}$.

При этом $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} = 0$, т.е. $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}\bar{n}}$. БМ2 содержит (рис. 1) множество фрагментов $\{\hat{O}_{\bar{e}}, \hat{O}_{\bar{a}\bar{i}}^{(2)}, \hat{O}_{\bar{i}}\}$, где $\hat{O}_{\bar{e}}$ – исходный фрагмент, $\hat{O}_{\bar{a}\bar{i}}^{(2)}$ – подмножество n внутренних фрагментов, $\hat{O}_{\bar{i}}$ – последний фрагмент. Такая модель называется базовой многофрагментной макромоделью (БММ) [8].

Начало функционирования системы описывается исходным фрагментом, который характеризуется набором параметров, представленных на рис. 1. Переход к i -му внутреннему фрагменту ($i = 1, \dots, n$) определяется последовательностью событий, которые заключаются в проявлении ДП, восстановлении ПС после их устранения.

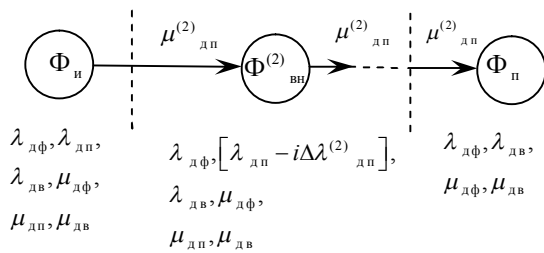


Рис. 1. Многофрагментная макромоделль БМ2

Переходы между внутренними фрагментами характеризуются параметром $\mu_{\bar{a}\bar{i}}$. Число внутренних фрагментов определяется выражением:

$$n = \frac{\lambda_{\bar{a}\bar{i}}}{\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}} - 1 \quad (7)$$

В выражении (7) и далее считаем, что отношение $\frac{\lambda_{\bar{a}\bar{i}}}{\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}}$ является целым числом. В последнем фрагменте все ДП ПС устранены, и функционирование системы определяется параметрами $\lambda_{\bar{a}\hat{o}}, \mu_{\bar{a}\hat{o}}, \lambda_{\bar{a}\hat{a}}, \mu_{\bar{a}\hat{a}}$.

3) БМ3 отличается от БМ2 тем, что $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} \neq 0$ и $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}\bar{n}} - \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} > 0$. БМ3 содержит множество фрагментов $\{\hat{O}_{\bar{e}}, \hat{O}_{\bar{a}\bar{i}}^{(3)}, \hat{O}_{\bar{i}}\}$, а число внутренних фрагментов

$$n = \frac{\lambda_{\bar{a}\bar{i}}}{\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}\bar{n}} - \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i}} - 1 \quad (8)$$

Следует заметить, что в БМ2 и БМ3 интенсивности восстановления отказов вследствие ДП ПС $\mu_{\bar{a}\bar{i}}^{(2)}$ и $\mu_{\bar{a}\bar{i}}^{(3)}$, хотя и остаются постоянными, но могут быть меньше, чем $\mu_{\bar{a}\bar{i}}^{(1)}$.

Таким образом, граф, соответствующий БМ3, отличается от графа на рис. 1 только значениями указанных выше параметров и числом внутренних фрагментов.

4) БМ4 отличается от БМ3 тем, что $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}\bar{n}} - \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} = 0$ при $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} \neq 0$. БМ4 (как и БМ1) может быть представлена однофрагментной моделью с интенсивностью восстановления отказов вследствие ДП ПС $\mu_{\bar{a}\bar{i}}^{(4)}$ меньшей, чем для БМ1 в силу дополнительных затрат времени на устранение дефектов.

5) БМ5 характеризуется тем, что в ней $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} \neq 0$, а $\Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{o}\bar{n}} - \Delta\lambda_{\bar{a}\bar{i}}^{\hat{a}i} < 0$ (рис. 2).

Переходы между внутренними фрагментами определяются параметром $\mu_{\bar{a}\bar{i}}^{(5)}$.

В такой макромоделе от фрагмента к фрагменту происходит накопление дефектов, что приведет к отказу системы (условно последний фрагмент выделен двойной линией, а соответствующие ему параметры не указаны).

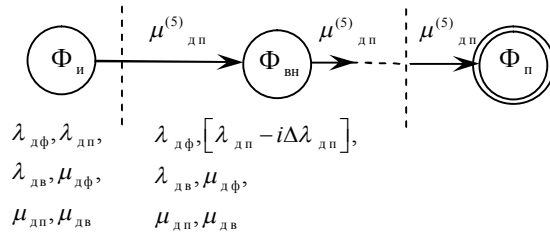


Рис. 2. Многофрагментная макромоделль БМ3

3. Качественный анализ функций готовности для разных моделей

На рис. 3 представлены в качественном виде графики зависимости функции готовности $K_T(t)$ ОКС от времени для описанных выше базовых моделей. Модель БМ0 соответствует предельному случаю (системе с идеальными ПС), когда $\lambda_{\bar{a}\bar{i}} = 0$.

Функции готовности БМ1 и БМ4 являются монотонно убывающими и имеют стационарные значения. Потери готовности для БМ1 по отношению к БМ0 связаны с остановками из-за проявления ДП ПС. Увеличение потерь готовности для БМ4 обусловлено дополнительными временными затратами при устране-

нии дефектов (и сопровождающим этот процесс внесением вторичных ДП ПС).

Характер зависимости для БМ2 подтвержден результатами моделирования в [8, 9]. Основываясь на этих результатах, можно предположить, что для БМ3 характер графика будет аналогичным, с дополнительными потерями готовности в силу уменьшения $\Delta\lambda_{\text{аі}}$ и увеличения числа фрагментов. Что касается БМ5, то здесь функция готовности скорее всего может быть монотонно убывающей без наличия стационарного значения (процесс с „гибелью“).

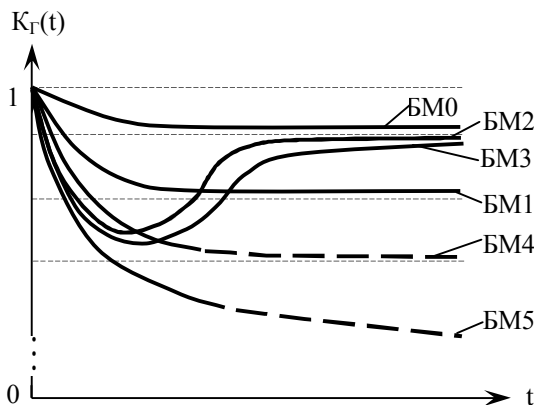


Рис. 3. Графики зависимости функции готовности от времени для разных базовых моделей

Выводы

Краткий анализ известных моделей надежности ПС с точки зрения учета возможности внесения дефектов при устранении обнаруженных ранее ДП ПС позволил установить, что в них не учитывается эффект, который можно назвать „эффектом вторичных дефектов“. Описаны возможные сценарии событий, учитывающих этот эффект, и соответствующие им параметры.

Предложенные базовые модели „снимают“ одно из традиционных и достаточно жестких, с точки зрения практики, допущений о том, что вторичные ДП ПС не вносятся в процессе устранения внесенных ранее первичных. Это приводит к необходимости детальной разработки и исследования моделей, учитывающих описанные сценарии поведения ОКС. При этом возникает ряд задач, касающихся определения законов распределения для числа устраненных и внесенных дефектов и их параметров.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что ОКС должны рассматриваться как системы с переменными параметрами не только вследствие изменения параметров потоков отказов и восстановлений вследствие ДП ПС, но и из-за вторичных дефектов.

Очевидно, что число исправленных первичных дефектов должно быть больше суммарного числа вторичных. В противном случае накопление дефектов может привести к отказу системы или существенному снижению ее готовности.

При больших рисках внесения новых дефектов возможно несколько стратегий поведения:

- изменение процедуры устранения дефектов и ее дополнительная верификация для снижения опасности внесения вторичных дефектов;
- отказ от устранения дефектов в случае, если допускается рестарт системы (модель БМ1);
- реинжиниринг ПС или системы в целом.

Наиболее универсальной и близкой к практической ситуации является модель БМ3. Разработка ее аналитического представления как многофрагментной марковской модели возможно только для усредненных значений $\Delta\lambda_{\text{аі}}$ ($\Delta\lambda_{\text{аі}}^{\text{он}}$, $\Delta\lambda_{\text{аі}}^{\text{аі}}$). В противном случае, когда такой подход невозможен, следует переходить к имитационному моделированию.

Дальнейшее исследование целесообразно направить на разработку математических моделей для расчета показателей безотказности ПС и готовности ОКС с учетом сформированного набора базовых параметров, а также, на разработку методик определения количественных значений этих параметров с учетом внесения „новых“ ДП ПС в ходе устранения „старых“.

Для этого тщательному анализу следует подвергнуть классические модели роста надежности ПС [4-6] с точки зрения возможности или невозможности их модификации с учетом вторичных дефектов и способа такой модификации, а также разработки новых моделей. Сложность этой задачи обусловлена недостаточной статистической информацией о вторичных дефектах. Исходя из этого обстоятельства, должна быть модифицирована методика их выбора, базирующаяся на анализе матриц допущений [7].

Литература

1. Avizienis A. *Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing* / A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, C. Landwehr // *IEEE Trans. On Dependable and Secure Computing*. – 2004. – Vol. 1. – № 1. – P. 11-33.
2. Харченко В.С. *Гарантоспособность и гарантоспособные системы: элементы методологии* / В.С. Харченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – Вип. 5(17). – С. 7-19.
3. Харченко В.С. *Анализ рисков аварий для ракетно-космической техники: эволюция причин и тенденций* / В.С. Харченко, В.В. Скляр, О.М. Тарасюк // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2003. – № 3. – С. 135-149.
4. Lyu M.R. *Handbook of Software Reliability Engineering* / M.R. Lyu. – USA: McGraw-Hill Company, 1996. – 803 p.

5. Полонников Р.И. Методы оценки показателей надежности программного обеспечения / Р.И. Полонников, А.В. Никандров. – СПб.: Политехника–1992. – 78 с.

6. Musa J.D. Software Reliability. Measurement. Prediction. Application / J.D. Musa. – USA: McGraw-Hill Company – 1987. – 395 p.

7. Kharchenko V.S. The Method of Software Reliability Growth Models Choice Using Assumptions Matrix / V.S. Kharchenko, O.M. Tarasyuk, V.V. Sklyar, V.Yu. Dubnitsky // Proceedings of 26th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Oxford, England, Aug. 2002. – P. 541-546.

8. Харченко В.С. Базовые многофрагментные макромоделли оценки надежности отказоустойчивых компьютерных систем информационно-

управляющих комплексов / В.С. Харченко, О.Н. Одаруценко, Е.Б. Одаруценко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – Вип. 5(17). – С. 62-70.

9. Поночовный Ю.Л. Моделирование надежности обновляемых программных средств нерезервированных информационно-управляющих систем постоянной готовности / Ю.Л. Поночовный, Е.Б. Одаруценко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. – №4(8). – С. 93-97.

10. Sanders J. Software Quality – A Framework for Success in Software Development and Support / J. Sanders. – USA: Addis. Wesley, 1994. – 112 p.

11. Канер С. Тестирование программного обеспечения / С. Канер, Д. Фолк, Е.К. Нгуен – М.: DiaSoft, 2001. – 544 с.

Поступила в редакцию 30.01.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. компьютерных и информационных технологий и систем Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. А.Л. Ляхов, Украина.

МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ, ЩО ОБСЛУГОВУЮТЬСЯ, З УРАХУВАННЯМ ВТОРИННИХ ДЕФЕКТІВ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

В.С. Харченко, О.М. Одаруценко, О.А. Руденко, О.Б. Одаруценко, Ю.Л. Поночовний

Аналізуються припущення, що використовуються у моделях надійності програмних засобів. Запропонований підхід до розробки моделей комп'ютерних систем, що обслуговуються, враховує можливості внесення нових (вторинних) дефектів під час усунення виявлених раніше (первинних) дефектів проектування програмних засобів. Описуються базові макромоделі на основі термінів багатофрагментних марківських моделей комп'ютерних систем, що обслуговуються, та аналізуються відповідні їм функції готовності.

Ключові слова: комп'ютерна система що обслуговується, надійність програмних засобів, дефект проектування, внесення дефектів, базові багатофрагментні макромоделі, модель Муси.

THE MODELLING OF SERVED COMPUTER SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE SECONDS DEFECTS OF PROGRAM MEANS

V.S. Kharchenko, O.N. Odarushchenko, A.A. Rudenko, E.B. Odarushchenko, Y.L. Ponochovniy

Admissions adopted in the models of reliability of program means are analysed. A new approach is suggested to the development of the models of served computer systems in which the possibilities of new defects in the process of removing defects, discovered earlier, in projecting of program means are taken into consideration. Basic macromodels in the terms of many-fragmentic Markov's models of served computer systems are described and their corresponding functions of readiness are analysed.

Key words: serviced computer systems, SW reliability, design defects, defects' injection, basic multi-fragment macro models, Musa model.

Харченко Вячеслав Сергеевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: v.kharchenko@khai.edu.

Одаруценко Олег Николаевич – канд. техн. наук, доцент, декан факультета информационных и телекоммуникационных технологий и систем Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, e-mail: skifs2005@mail.ru.

Руденко Александр Антонович – старший преподаватель кафедры компьютерных и информационных технологий и систем Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, e-mail: olekrudenko@yandex.ru.

Одаруценко Елена Борисовна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры военных телекоммуникационных сетей и защиты информации Военного института телекоммуникаций и информатизации национального технического университета Украины „КПИ“, Полтава, Украина.

Поночовный Юрий Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры беспроводных технологий в военных телекоммуникационных системах и сетях Военного института телекоммуникаций и информатизации национального технического университета Украины „КПИ“, Полтава, Украина, e-mail: pnchl@ Rambler.ru.