

УДК 004.05:629.7

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВИОНИКИ ВЕРТОЛЕТОВ

¹Бойко В.А., ²Петров Д.Ю., ²Резчиков А.Ф., ²Кушников В.А., ²Иващенко В.А.,
²Богомолов А.С., ²Филлимонюк Л.Ю., ²Григоренко В.В.

¹ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
Саратов, e-mail: evan011@mail.ru;

²ФГБУ «Институт проблем точной механики и управления» РАН, Саратов, e-mail: iptmuran@san.ru

В процессе разработки программного обеспечения систем интегрированной авионики вертолетов необходимо учесть изменения значений характеристик качества программного обеспечения, возникающие из-за наличия большого количества нелинейных причинно-следственных связей, существующих между моделируемыми характеристиками, а также влияния на них параметров окружающей среды. На основе авиационных стандартов определены основные показатели качества программного обеспечения, а также внешние факторы, оказывающие влияние на моделируемые характеристики. Разработан граф причинно-следственных связей, характеризующий сложную систему причинно-следственных взаимоотношений между характеристиками программного обеспечения. На основе статистических данных, а также экспертного опроса специалистов определены зависимости между моделируемыми характеристиками и внешними факторами. Предложен комплекс математических моделей и алгоритмов, позволяющих прогнозировать характеристики программного обеспечения, при проектировании систем интегрированной авионики вертолетов за счет использования системно-динамического подхода и теории причинно-следственных комплексов. Рассмотрен пример практического использования разработанного математического обеспечения для вертолета МИ-171. Построена система дифференциальных уравнений по основным показателям качества и влияющим на них факторам на основе имеющейся статистики и оценок экспертов для вертолета МИ-171. Построены графики моделируемых характеристик качества программного обеспечения, а также получены сравнительные данные среднего квадратичного отклонения показателей качества программного обеспечения.

Ключевые слова: математическое моделирование, причинно-следственная взаимосвязь, прогнозирование, программное обеспечение, интегрированная авионика, модель системной динамики

PREDICTION OF SOFTWARE CHARACTERISTICS AT THE DESIGNING OF HELICOPTERS INTEGRATED AVIONICS

¹Boyko V.A., ²Petrov D.Yu., ²Rezchikov A.F., ²Kushnikov V.A., ²Ivaschenko V.A.,
²Bogomolov A.S., ²Fillimonjuk L.Yu., ²Grigorenko V.V.

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: evan011@mail.ru;

²Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, e-mail: iptmuran@san.ru

During software development of integrated avionics for helicopters it is necessary to consider the changes of software quality characteristics that arise due to the presence of a large number of nonlinear causal relationships existing between the simulated characteristics and influence on them environmental parameters. Based on aviation standards the main software quality characteristics and external factors are defined which influence on simulated characteristics. A graph of cause-effect relationships is developed which describes a complex system of cause-effect relationships between the characteristics of software. The relationships between the simulated characteristics and external factors are determined with using statistical data and expert analysis. A complex of mathematical models and algorithms are proposed which allows predicting characteristics of software during development systems of integrated avionics for helicopters through using a system-dynamic approach and theory of cause-effect complexes. Using of developed mathematical models and algorithms for helicopter MI-171 is considered as an example. The graphics of simulated software quality characteristics are constructed and comparative data of the standard deviation of software quality indicators are got.

Keywords: mathematical modeling, causal relationship, prediction, software, integrated avionics, system-dynamic model

В основу разработки программного обеспечения (ПО) встроенных систем интегрированной авионики (СИА) положены требования авиационных стандартов [1–3]:

– стандарт ГОСТ Р 51904-2002 «Программное обеспечение встроенных систем», определяющий требования к процессу разработки, тестирования и сертификации ПО СИА;

– стандарт DO-178B «Требования к программному обеспечению бортовой аппара-

туры и систем при сертификации авиационной техники»;

– стандарт ARINC-653, регламентирующий временное и пространственное разделение ресурсов бортового вычислителя.

В соответствии с этими стандартами качество ПО СИА характеризуется комплексным многокритериальным показателем, отражающим качество работы не только отдельных взятых компонентов ПО, но и их причинно-следственные взаимодействия [4].

В связи с этим при разработке ПО систем интегрированной авионики вертолетов актуальной является задача прогнозирования характеристик ПО.

Подход к прогнозированию показателей качества функционирования ПО

Для решения задачи прогнозирования характеристик ПО систем интегрированной авионики вертолетов в соответствии со стандартами [5, 6] выделены основные показатели (моделируемые переменные) качества функционирования ПО:

- $X_1(t)$ – функциональность;
- $X_2(t)$ – надежность;
- $X_3(t)$ – защищенность;
- $X_4(t)$ – готовность;
- $X_5(t)$ – временная эффективность;
- $X_6(t)$ – сертифицированность;
- $X_7(t)$ – мобильность;
- $X_8(t)$ – стабильность;
- $X_9(t)$ – ресурсоемкость.

Для решения задачи использован комплекс математических моделей, построенный на основе аппарата системной динамики Форрестера [7].

Некоторые из переменных носят качественный характер. Для оценки этих переменных использованы количественные шкалы, имеющие ясный физический смысл. Для проведения расчетов использованы нормированные значения моделируемых переменных

$$X_i^H(t) = X_i(t) / X_i^{\max}, i = \overline{1,9},$$

где $X_i(t)$ – текущее значение характеристики, определенное в численной шкале; $X_i^{\max}$ – максимальное значение переменной $X_i(t)$.

Процесс решения задачи включает в себя следующие этапы:

1. Определение множества наиболее значимых факторов $F_i(t), i = \overline{1,v}$, влияющих на моделируемые переменные $X_i(t), i = \overline{1,9}$;
2. Построение графа причинно-следственных связей G_{pss} , отражающего взаимосвязи между переменными $X_i(t), i = \overline{1,9}$ и внешними факторами $F_i(t), i = \overline{1,v}$.
3. Определение вспомогательных функций $f_1(F_1)f_2(F_2)\dots f_k(F_k)$, используемых при расчете моделируемых переменных.
4. Составление дифференциальных уравнений системной динамики, определяющих значения переменных $X_i(t), i = \overline{1,9}$ на различных временных интервалах.
5. Решение дифференциальных уравнений.
6. Анализ полученных решений – прогнозных значений переменных.

Результаты системного анализа комплекса мероприятий, необходимых для поддержания требуемого уровня качества про-

граммного обеспечения интеллектуальных систем, показывают, что в общем случае в качестве внешних факторов целесообразно использовать следующие показатели [8]:

- $F_1(t)$ – системные и программные требования;
- $F_2(t)$ – инструменты разработки ПО;
- $F_3(t)$ – опыт разработчиков ПО;
- $F_4(t)$ – опыт эксплуатационного персонала;
- $F_5(t)$ – трудоемкость разработки ПО;
- $F_6(t)$ – бюджет разработки.

Показатели $F_3(t)\dots F_6(t)$ измеряются в количественной шкале, а показатели $F_1(t)\dots F_2(t)$ сводятся к количественной шкале с помощью известных алгоритмов и процедур теории нечетких множеств [3]. При проведении математического моделирования в дальнейшем используются их нормированные значения, определенные из следующего выражения:

$$F_i^H(t) = F_i(t) / F_i^{\max}, i = \overline{1,6},$$

где $F_i(t)$ – текущее значение фактора, определенное в численной шкале; $F_i^{\max}(t)$ – максимальное значение).

Разработка графа причинно-следственных связей переменных системы и внешних факторов

Данный граф характеризует сложную систему причинно-следственных связей между рассматриваемыми переменными и внешними факторами. Вершины графа соответствуют переменным $X_i(t), i = \overline{1,9}$, дуги определяют причинно-следственные отношения между ними – направление и тип связи переменных и факторов.

Определение связей всех переменных и факторов позволяет получить граф причинно-следственных отношений (рис. 1).

Зависимости между переменными и факторами были определены на основе статистических данных и экспертного опроса специалистов [9].

На основе разработанного графа для моделируемых характеристик $X_i(t), i = \overline{1,9}$ составляются дифференциальные уравнения следующего вида:

$$dX_i / dt = X_i^+(t) - X_i^-(t),$$

$$X_i^+(t) = \Pi_i^+ S_i^+, X_i^-(t) = \Pi_i^- S_i^-,$$

где X_i – моделируемая переменная; Π_i^+ и S_i^+ – соответственно произведение переменных и сумма внешних факторов положительно, а Π_i^- и S_i^- – отрицательно влияющих на рост переменной $X_i(t)$. Таким образом дифференциальное уравнение для переменной $X_i(t)$ имеет вид

$$dX_i / dt = \Pi_i^+ S_i^+ - \Pi_i^- S_i^-.$$

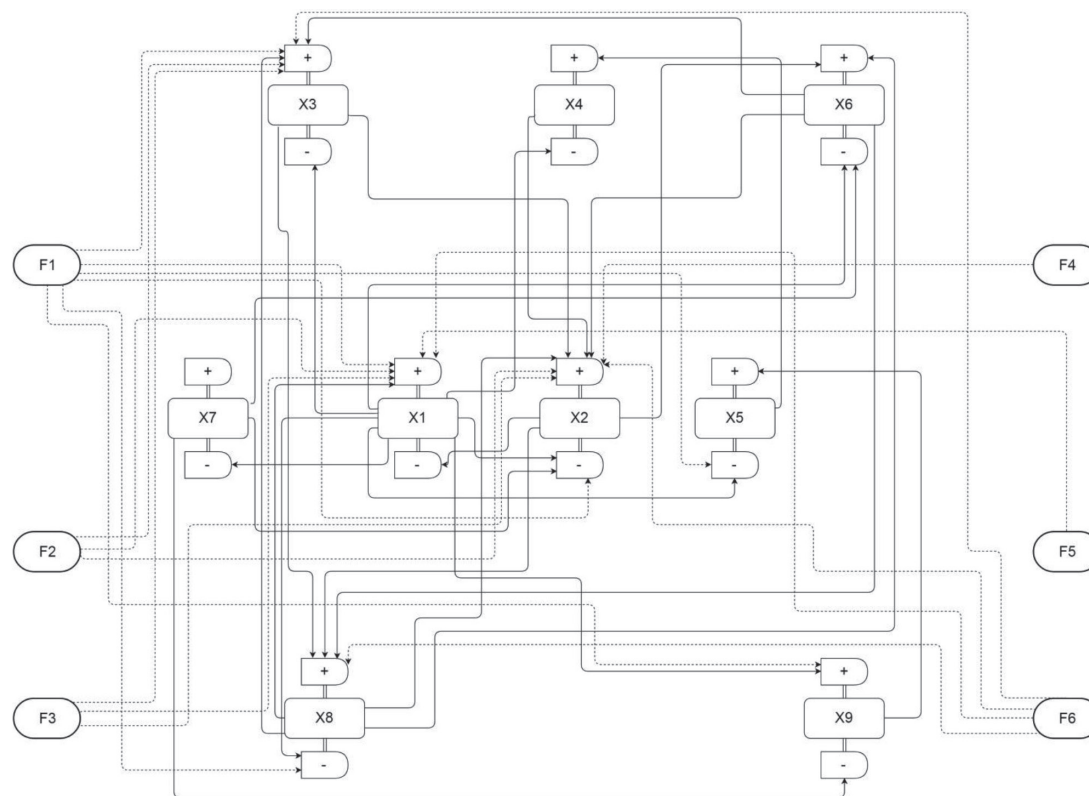


Рис. 1. Граф причинно-следственных отношений

На основе данного соотношения и причинно-следственного графа, приведенного на рис. 1, построим уравнения системной динамики:

$$dX_1 / dt = B_{1-8}(X_8)(F_1 + F_2 + F_3 + F_5 + F_6) - B_{1-2}(X_2),$$

$$dX_2 / dt = B_{2-3}(X_3)B_{2-4}(X_4)B_{2-6}(X_6)B_{2-8}(X_8)(F_3 + F_4 + F_5 + F_7) - B_{2-1}(X_1)B_{2-7}(X_7)(F_1),$$

$$dX_3 / dt = B_{3-6}(X_6)B_{3-8}(X_8)(F_1 + F_2 + F_3 + F_6) - B_{3-1}(X_1),$$

$$dX_4 / dt = B_{4-5}(X_5) - B_{4-1}(X_1),$$

$$dX_5 / dt = B_{5-9}(X_9) - B_{5-1}(X_1)F_1,$$

$$dX_6 / dt = B_{6-2}(X_2)B_{6-8}(X_8) - B_{6-1}(X_1)B_{6-7}(X_7),$$

$$dX_7 / dt = B_{7-1}(X_1)F_1,$$

$$dX_8 / dt = B_{8-2}(X_2)B_{8-3}(X_3)B_{8-6}(X_6)F_6 - B_{8-1}(X_1)F_1,$$

$$dX_9 / dt = B_{9-1}(X_1)F_1 - B_{9-7}(X_7).$$

Выражения вида $B_{i-j}(X_j), i, j = \overline{1,9}$ обозначают зависимости переменной X_i от X_j и определяются на основе экспертного опроса специалистов и аппроксимации статистических данных.

В качестве примера выполним аппроксимацию статистических данных для выражений $B_{4-j}(X_j), j = 1, 5$ и факторов F_1, F_4 .

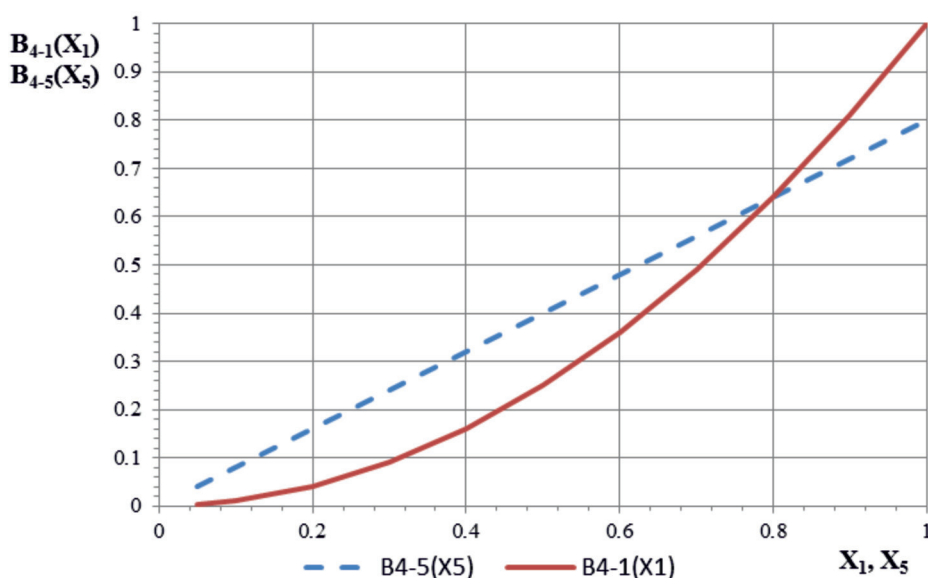


Рис. 2. Зависимость системной переменной X_4 от системных переменных X_1 и X_5

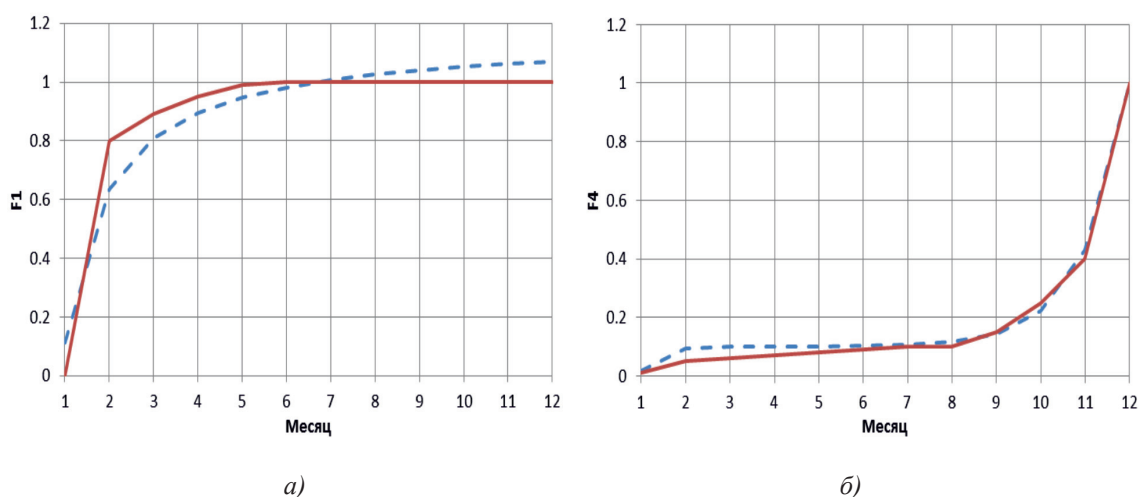


Рис. 3. Графики вспомогательных функций математической модели

На рис. 2 представлены графики зависимости системной переменной X_4 от системных переменных X_1 и X_5 .

Величина $B_{4-1}(X_1)$ на начальном отрезке резко уменьшается с ростом X_1 , но начиная с некоторого значения увеличение X_1 не приводит к значительному снижению, поэтому выражение $B_{4-1}(X_1)$ может быть аппроксимировано следующей функцией:

$$B_{4-1}(X_1) = e^{-a_{4-1}X_1},$$

где a – коэффициент, определенный на множестве действительных чисел.

Величина $B_{4-5}(X_5)$ прямо пропорционально зависит от X_5 и определяется линейным выражением

$$B_{4-5}(X_5) = k_{4-5}X_5 + b_{4-5},$$

где a , b , k – коэффициенты, определенные на множестве действительных чисел.

На рис. 3 представлены графики нормированных статистических (сплошная линия) и аппроксимированных (пунктирная линия) данных для внешних факторов.

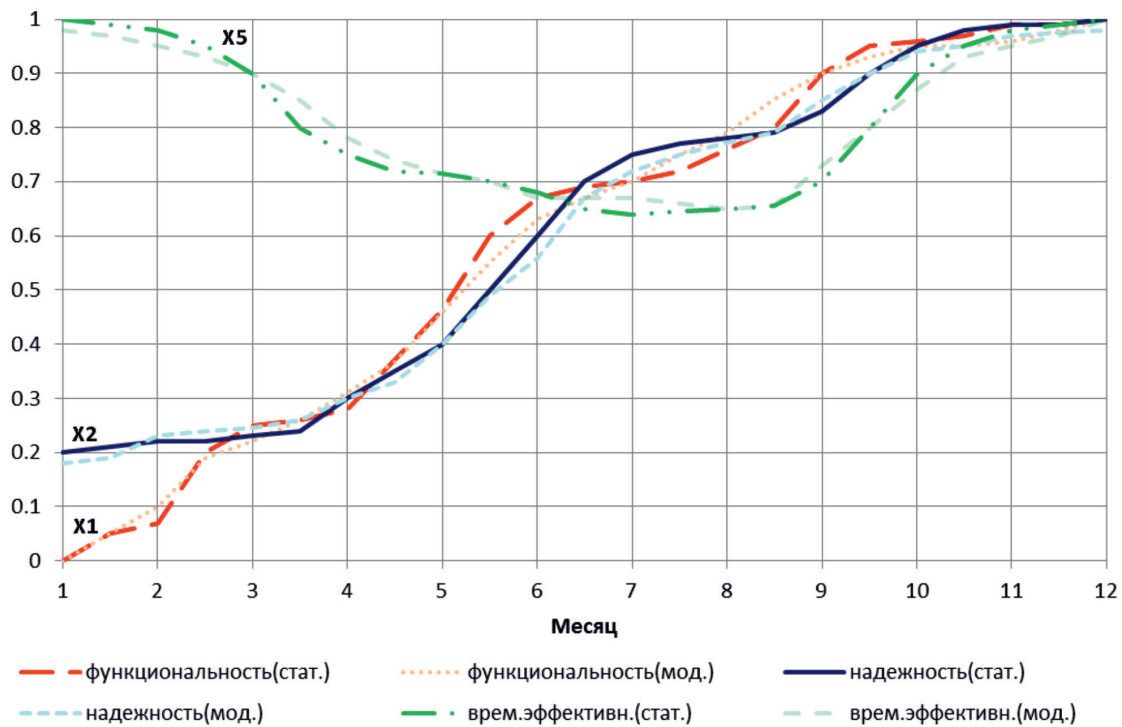


Рис. 4. Графики основных моделируемых показателей качества программного обеспечения

После аппроксимации статистических данных уравнения внешних факторов будут иметь следующий вид:

$$F_1 = 1,1561 - 1,0451 / t; F_2 = 0,0005t^3 - 0,0175t^2 + 0,2374t - 0,2204,$$

$$F_3 = -0,00303t^3 + 0,05401t^2 - 0,1346t + 0,08369,$$

$$F_4 = e^t / 180900,8 - e^{-2,5t} + 0,09986,$$

$$F_5 = 0,0033t^3 + 0,0412t^2 - 0,0589t + 0,4764,$$

$$F_6 = 1,058 - 1,0139 / t.$$

На основе имеющейся статистики, а также экспертных оценок показателей качества ПО для вертолета МИ-171 выполним конкретизацию множителей и слагаемых, входящих в данную систему уравнений по основным переменным и факторам.

$$\frac{dX_1}{dt} = 0,090925X_8(-0,0008t^3 + 0,0777t^2 + 0,0439t - 2,059 / t + 2,2481) -$$

$$-0,946X_2^2 + 1,85X_2 - 1,04,$$

$$dX_2 / dt = 0,8645X_3(0,7698X_4 + 0,5673)(e^{1,153X_6} / 2,109 - 0,50213)(0,9647X_8 -$$

$$-0,1597)(-0,0003t^3 + 0,09521t^2 - 0,1935t + e^t / 180900,8 - e^{-2,5t} -$$

$$-1,0139 / t + 1,61809) - 1,748X_1(0,9674X_7^2 - 0,231)(1,1561 - 1,0451 / t),$$

$$dX_3 / dt = 1,279X_6X_8(-0,00253t^3 + 0,03651t^2 + 0,1028t - 2,059 / t + 2,07739) - 2,647X_1,$$

$$\begin{aligned}
 dX_4 / dt &= 0,927X_5 - e^{-1,564X_1} + 0,216, \\
 dX_5 / dt &= 0,984X_9 - 1,687X_1(1,1561 - 1,0451/t), \\
 dX_6 / dt &= e^{1,023X_2 + 0,874X_8} - 0,261e^{-0,962X_1}X_7, \\
 dX_7 / dt &= -e^{-0,784X_1}(1,1561 - 1,0451/t), \\
 dX_8 / dt &= 0,635X_2^2X_6(0,271X_3 - 0,14)(1,058 - 1,0139/t) - X_1(1,1561 - 1,0451/t), \\
 dX_9 / dt &= 1,087X_1(1,1561 - 1,0451/t) - e^{-0,681X_7}.
 \end{aligned}$$

Полученную систему уравнений решаем методом Рунге – Кутты 4-го порядка точности.

На рис. 4 представлены графики статистических и рассчитанных данных для функциональности X_1 , надежности X_2 и временной эффективности X_5 .

Сравнительные показатели среднего квадратичного отклонения для статистических и моделируемых данных приведены в таблице.

Сравнительные данные среднего квадратичного отклонения показателей качества программного обеспечения

Тип данных	Среднее квадратичное отклонение		
	X1	X2	X5
Статистические	2,560	2,073	0,443
Моделируемые	2,515	1,989	0,361

Заключение

Предложен подход к прогнозированию характеристик программного обеспечения для систем интегрированной авионики перспективных вертолетов, обеспечивающий повышение качества программного обеспечения в условиях наличия большого количества нелинейных причинно-следственных связей, существующих между характеристиками, а также влиянием на них параметров внешней среды.

Разработан комплекс взаимосвязанных моделей для прогнозирования характеристик программного обеспечения с использованием системно-динамического подхода.

Построена система дифференциальных уравнений по основным характеристикам программного обеспечения и влияющим

на них внешним факторам на основе имеющейся статистики и оценок экспертов.

Предложенный комплекс моделей рассмотрен на примере прогнозирования характеристик программного обеспечения для вертолета МИ-171.

Список литературы

1. Гинис Л.А. Организация проверки качества программного обеспечения бортового оборудования авиационной техники / Л.А. Гинис, К.С. Дубовская // Инновационная наука. – 2015. – № 12. – С. 42–43.
2. Горбаченко И.М. Оценка качества программного обеспечения для создания систем тестирования / И.М. Горбаченко // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–4. – С. 823–827.
3. Отказобезопасные информационно-управляющие системы на программируемой логике / Е.С. Бахмач, А.Д. Герасименко, В.А. Головир и др. – Кировоград: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Научно-производственное предприятие «Радий», 2008. – 380 с.
4. Резчиков А.Ф. Причинно-следственные комплексы взаимодействий в производственных процессах / А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов // Проблемы управления. – 2010. – № 3. – С. 51–59.
5. КТ-178В. Квалификационные требования. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники. – М.: Научно-исследовательский институт авиационного оборудования, 2002. – 99 с.
6. ГОСТ Р 51904-2002. Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию. – М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2002. – 67 с.
7. Форрестер Д. Мировая динамика / Д. Форрестер; пер. с англ. А. Ворожука и С. Пегова, науч. ред. Д. Гвишиани, Н. Моисеева. – М.: АСТ, СПб.: TerraFantastica, 2003. – 379 с.
8. Долинина О.Н. Управление процессом создания программного обеспечения систем принятия решений по критерию качества / О.Н. Долинина, А.Ф. Резчиков // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – № 3(69). – С. 78–82.
9. Бойко В.А. Архитектура программного комплекса для проектирования программного обеспечения авионики / В.А. Бойко, Д.Ю. Петров // Математические методы в технике и технологиях. – 2016. – № 12. – С. 155–158.