

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБНОВЛЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ НА ГОТОВНОСТЬ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В статье рассмотрена многофрагментная модель информационно-управляющей системы обслуживаемого космического аппарата. При построении модели учтены проведение обновления программных средств в процессе эксплуатации системы, а также устранение выявленных программных дефектов. По результатам моделирования сделаны выводы о способах определения оптимальных временных параметров проведения обновления программных средств.

Ключевые слова: многофрагментное моделирование, устранение программных дефектов, обновление программных средств.

Введение. Проблема моделирования и оценки готовности ИУС КА

Одним из факторов, влияющих на развитие ракетно-космической отрасли, является улучшение характеристик и повышение надежности и готовности информационно-управляющих систем (ИУС) космических аппаратов (КА), качества их аппаратных средств и программного обеспечения. В данной работе рассмотрены пилотируемые КА, в которых предусмотрено восстановление работоспособного состояния аппаратных средств ИУС силами экипажа. Программные средства (ПС) таких КА относят к классу критических и имеют ряд особенностей, в частности, возможные модификации и реинжиниринг программного обеспечения в процессе длительной эксплуатации космического комплекса.

При стандартном подходе разработка критических ПС является дорогостоящим процессом, причем большую часть затрат занимает не создание программного кода, а его квалификационные испытания [1]. Высокая стоимость испытаний связана с необходимостью моделирования в земных условиях внешних условий окружающего открытого космического пространства. Применение в бортовых системах КА программных средств с возможностью их модификации (путем проведения обновлений ПС в процессе их эксплуатации) позволяет более гибко распределять этапы верификации. Так, ряд некритических программных функций возможно доверифицировать после запуска космического аппарата и устранить выявленные дефекты при проведении очередного обновления ПС в ходе эксплуатации КА. Однако, учитывая высокую критичность ПС, такой выбор необходимо предварительно обосновать с помощью математических моделей.

В существующих моделях систем с изменяемыми параметрами используют натурный эксперимент

[2], методы имитационного моделирования [3], Байесовские методы исследования [4] и аппарат марковских и полумарковских процессов [5]. Систематизация процесса моделирования (определение множества состояний, переходов между ними, интенсивностей переходов) при использовании аппарата марковских (полумарковских) процессов делает этот подход более предпочтительным. В [6] развит системный подход к построению многофрагментных моделей, однако в нем не предусмотрено моделирование процедур обновления ПС с учетом специфики полета КА.

Целью данного исследования является разработка и анализ модели готовности ИУС пилотируемых КА при проведении обновлений ПС. Предложена методика построения модели на основе определения множеств состояний и механизмов взаимодействия. Для оценки функции готовности выполнены расчет и исследования марковской модели для различных наборов входных данных.

1. Основные допущения моделирования

Для построения модели готовности ИУС КА приняты следующие допущения:

– в данной работе рассматривается наиболее распространенная архитектура ИУС КА, которая включает два аппаратных канала, в каждом из которых функционирует одинаковая версия ПС, система контроля работоспособности АС считается абсолютно надежной;

– ИУС в любой момент времени может находиться либо в работоспособном, либо в неработоспособном состоянии;

– потоки событий, переводящих систему из одного функционального состояния в другое, – простейшие;

– восстановление ИУС после отказа, вызванного программным дефектом, производится с помощью перезапуска ПС;

- в процессе функционирования ИУС выполняется обновление ПС, состояние обновления является планируемо неработоспособным (состояние неготовности);
- устранение программных дефектов выполняется после проведения обновления ПС;
- в ходе исправления программных дефектов, новые дефекты не вносятся;
- допускается полное устранение всех невыявленных до применения системы дефектов.

2. Обоснование входных параметров модели

В ходе проведения исследований с целью выявления характера изменения поведения функции готовности, часть входных параметров модели имели фиксированные значения, остальные параметры изменялись в пределах заданных интервалов значений. Фиксированные значения имеют следующие параметры:

- интенсивность отказов одного аппаратного канала $\lambda_{HW} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ (1/час);
- интенсивность восстановления одного аппаратного канала $\mu_{HW} = 1,5$ (1/час);
- начальная интенсивность отказов ПС $\lambda_{SW0} = 4 \cdot 10^{-3}$ (1/час);
- интенсивность восстановления системы после проявления программного дефекта (путем перезапуска ПС) $\mu_{SW} = 2$ (1/час);
- интенсивность отказов ПС после устранения всех дефектов равна нулю $\lambda_{SWk} = 0$ (1/час).

Для исследования готовности системы были приняты следующие изменяемые значения входных параметров:

Таблица 1

Переменные значения входных параметров модели

Параметр модели	Переменные значения параметров			
$\Delta\lambda_{SW}$ (1/час)	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
λ_{UP} (1/час)	$4,63 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	
μ_{UP} (1/час)	0,33	0,5	1	

При моделировании можно выделить «базисные» значения изменяемых входных параметров:

- шаг изменения интенсивности отказов ПС $\Delta\lambda_{SW} = 10^{-4}$ (1/час);
- интенсивность проведения обновлений ПС $\lambda_{UP} = 4,63 \cdot 10^{-4}$ (1/час);
- интенсивность восстановления работоспособного состояния системы после проведения обновления ПС $\mu_{UP} = 0,5$ (1/час).

3. Разработка и исследование модели готовности ИУС КА

С учетом принятых допущений, в качестве метода исследования принимается марковский анализ, а учет изменения интенсивности отказов λ_{SW} осуществляется с помощью аппарата регулярных многофрагментных марковских моделей (РМФМ) [6]. Поэтому в качестве базовой модели выбрана РМФМ, граф которой изображен на рис. 1.

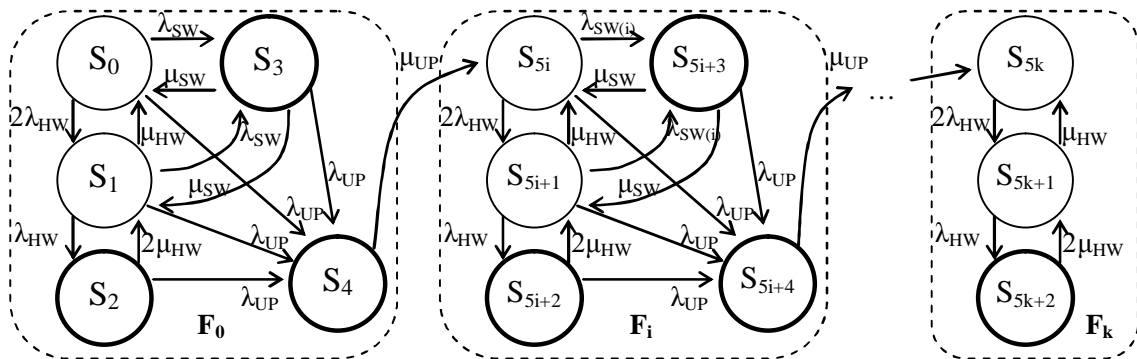


Рис. 1. Размеченный граф функционирования ИУС обслуживаемого КА при проведении обновлений ПС

Процесс функционирования ИУС происходит следующим образом. В начальный момент система реализует все предписанные функции и находится в состоянии S_0 . В процессе функционирования проявляются аппаратные дефекты, вследствие чего система последовательно переходит в состояния S_1 (отказ одного из аппаратных каналов, система работоспособна), S_2 (отказ сразу двух аппаратных каналов, система неработоспособна) и восстанавливаются (система возвращается в состояния S_0 и S_1). Через определенный временной интервал происходит отказ системы, вызванный программным дефектом, и она переходит в состояние S_3 . После проявления программного дефекта система восстанавливается путем перезапуска

ПС, вследствие чего переходит в состояние S_0 .

Также через определенный временной интервал выполняются процедуры обновления ПС, система переходит в состояние S_4 . В ходе проведения процедур обновления выполняется устранение выявленных программных дефектов, вследствие чего система переходит в новый фрагмент РМФМ (состояние S_{5i}), который характеризуется новым параметром λ_{SWi} .

В последнем фрагменте модели все программные дефекты устранены, и в системе происходят только отказы аппаратных средств. Система дифференциальных уравнений Колмогорова для модели надежности, граф которой изображен на рис. 1 будет состоять из следующих регулярных блоков:

Для начального фрагмента F_0 :

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(2\lambda_{HW} + \lambda_{SW} + \lambda_{UP})P_0(t) + \mu_{HW}P_1(t) + \mu_{SW}P_3(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{HW} + \lambda_{SW} + \mu_{HW} + \lambda_{UP})P_1(t) + 2\lambda_{HW}P_0(t) + 2\mu_{HW}P_2(t) + \mu_{SW}P_3(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -(2\mu_{HW} + \lambda_{UP})P_2(t) + \lambda_{HW}P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = -(2\mu_{SW} + \lambda_{UP})P_3(t) + \lambda_{SW}P_0(t) + \lambda_{SW}P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -\mu_{UP}P_4(t) + \lambda_{UP}P_0(t) + \lambda_{UP}P_1(t) + \lambda_{UP}P_2(t) + \lambda_{UP}P_3(t). \end{cases}$$

Для внутренних фрагментов F_i :

$$\begin{cases} \frac{dP_{5i}(t)}{dt} = -(2\lambda_{HW} + \lambda_{SW(i)} + \lambda_{UP})P_{5i}(t) + \mu_{HW}P_{5i+1}(t) + \mu_{UP}P_{5i-1}(t) + \mu_{SW}P_{5i+3}(t), \\ \frac{dP_{5i+1}(t)}{dt} = -(\lambda_{HW} + \lambda_{SW(i)} + \mu_{HW} + \lambda_{UP})P_{5i+1}(t) + 2\lambda_{HW}P_{5i}(t) + 2\mu_{HW}P_{5i+2}(t) + \\ + \mu_{SW}P_{5i+3}(t), \\ \frac{dP_{5i+2}(t)}{dt} = -(2\mu_{HW} + \lambda_{UP})P_{5i+2}(t) + \lambda_{HW}P_{5i+1}(t), \\ \frac{dP_{5i+3}(t)}{dt} = -(2\mu_{SW} + \lambda_{UP})P_{5i+3}(t) + \lambda_{SW(i)}P_{5i}(t) + \lambda_{SW(i)}P_{5i+1}(t), \\ \frac{dP_{5i+4}(t)}{dt} = -\mu_{UP}P_{5i+4}(t) + \lambda_{UP}P_{5i}(t) + \lambda_{UP}P_{5i+1}(t) + \lambda_{UP}P_{5i+2}(t) + \lambda_{UP}P_{5i+3}(t). \end{cases}$$

Для последнего фрагмента F_k :

$$\begin{cases} \frac{dP_{5k}(t)}{dt} = -2\lambda_{HW}P_{5k}(t) + \mu_{HW}P_{5k+1}(t) + \mu_{UP}P_{5k-1}(t) + \mu_{SW}P_{5k-2}(t), \\ \frac{dP_{5k+1}(t)}{dt} = -(\lambda_{HW} + \mu_{HW})P_{5k+1}(t) + 2\lambda_{HW}P_{5k}(t) + 2\mu_{HW}P_{5k+2}(t), \\ \frac{dP_{5k+2}(t)}{dt} = -2\mu_{HW}P_{5k+2}(t) + \lambda_{HW}P_{5k+1}(t). \end{cases}$$

Здесь i – номера внутренних фрагментов; k – номер последнего фрагмента.

Значение функции готовности определяется из выражения:

$$A(t) = \sum_{i=0}^k [P_{5i}(t) + P_{5i+1}(t)].$$

При исследовании модели особый интерес представляет начальный этап функционирования системы, поэтому при расчетах рассматривался временной интервал $T = 15000$ часов (примерно 1,5 года) с количеством участков интегрирования – 100. Выходные результаты получены с помощью модифицированного экспоненциального метода численного решения жестких систем дифференциальных уравнений [7].

Результаты вычислений представлены в виде графической зависимости функции готовности от времени функционирования систем на рис. 2 – рис. 5. Результирующие функции сравниваются со стационарным коэффициентом готовности дублиро-

ванной одноверсионной ИУС, полученным при неизменных начальных параметрах λ_{HW} , μ_{HW} , λ_{SW0} , μ_{SW} с помощью однофрагментного моделирования.

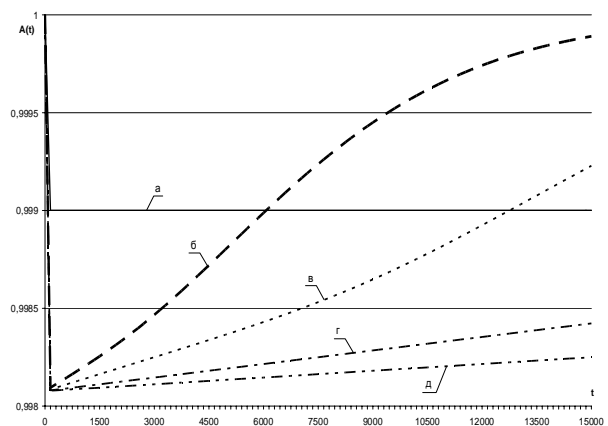


Рис. 2. Графические зависимости изменения функции готовности ИУС от времени эксплуатации системы для однофрагментной модели (а) и при различных значениях $\Delta\lambda_{sw}$: б – $\Delta\lambda_{sw}=10^{-3}$; в – $\Delta\lambda_{sw}=5 \cdot 10^{-4}$; г – $\Delta\lambda_{sw}=2 \cdot 10^{-4}$; д – $\Delta\lambda_{sw}=10^{-4}$

Анализ графиков на рис. 2 показал, что значение параметра $\Delta\lambda_{sw}$ оказывает основное влияние на скорость устранения дефектов (чем больше $\Delta\lambda_{sw}$, тем быстрее функция готовности многофрагментной модели переходит в стационарное состояние). Кроме того, значение $\Delta\lambda_{sw}$ никак не влияет на величину минимума функции готовности на начальном этапе эксплуатации системы.

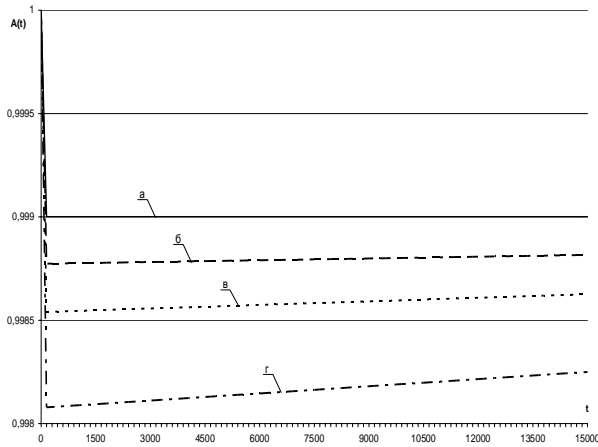


Рис. 3. Графические зависимости изменения функции готовности ИУС от времени эксплуатации системы для однофрагментной модели (а) и при различных значениях λ_{up} : б – $\lambda_{up} = 1,14 \cdot 10^{-4}$; в – $\lambda_{up} = 2,31 \cdot 10^{-4}$; г – $\lambda_{up} = 4,63 \cdot 10^{-4}$

Анализ графиков на рис. 3 показал, что значение параметра λ_{up} существенно влияет на величину минимума функции готовности. Это легко объясняется тем, что с увеличением количества обновлений увеличивается и суммарное время пребывания системы в состоянии обновления ПС (а это состояние считается неработоспособным). Кроме того значение параметра λ_{up} влияет на скорость перехода функции готовности в стационарный режим (кривая (г) имеет большую крутизну чем кривые (б) и (в) на рис. 3). Однако, из рис. 3 сложно судить о характере выигрыша в скорости перехода функции готовности в стационарный режим, поэтому необходимо провести дополнительные исследования при значениях λ_{up} , больших, чем предложено в п. 2.

Это позволит проследить полное устранение программных дефектов на исследуемом временном промежутке в 15000 часов.

Из рис. 4 видно, что значение параметра μ_{up} влияет на величину минимума функции готовности многофрагментной модели (это связано с тем, что с увеличением μ_{up} уменьшается суммарное время пребывания системы в состоянии обновления ПС). Влияние параметра μ_{up} на скорость перехода функции готовности в стационарный режим из рис.4 не прослеживается (на графиках нет перехода функции в стационарный режим), так как при принятых параметрах не происходит полное устранение программных дефектов на протяжении временного ин-

тервала в 15000 часов. Следовательно, необходимо провести дополнительные исследования при других значениях параметров μ_{up} и λ_{up} .

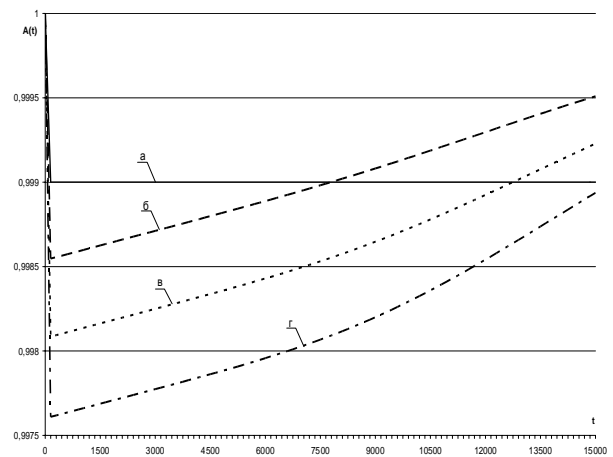


Рис. 4. Графические зависимости изменения функции готовности ИУС от времени эксплуатации системы для однофрагментной модели (а) и при различных значениях μ_{up} : б – $\mu_{up} = 1$; в – $\mu_{up} = 0,5$; г – $\mu_{up} = 0,33$

Так как информации на рис. 3 и 4 недостаточно, чтобы охарактеризовать поведение функции готовности, принято решение на исследование модели при дополнительном наборе входных параметров (табл. 2).

Результаты моделирования при значениях параметров из табл. 2 представлены на рис. 5.

Таблица 2
Дополнительные значения входных параметров модели

Параметр модели	Переменные значения параметров		
λ_{up} (1/час)	0,0014	0,014	
μ_{up} (1/час)	1	3	5

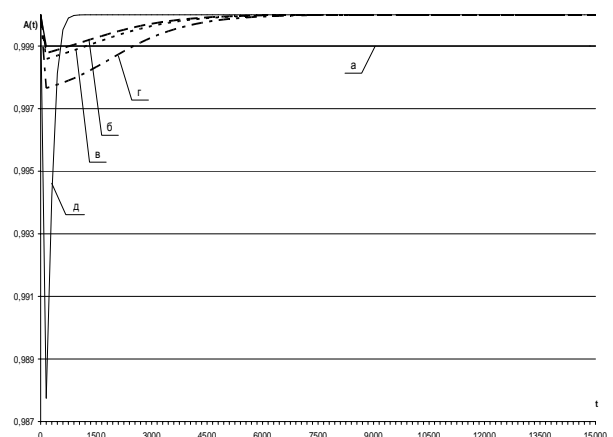


Рис. 5. Графические зависимости изменения функции готовности ИУС от времени эксплуатации системы для однофрагментной модели (а) и при дополнительных вариантах значений λ_{up} , μ_{up} : б – $\lambda_{up}=0,0014$ и $\mu_{up} = 5$; в – $\lambda_{up}=0,0014$ и $\mu_{up} = 3$; г – $\lambda_{up}=0,0014$ и $\mu_{up} = 1$; д – $\lambda_{up}=0,014$ и $\mu_{up} = 1$

На рис. 5 хорошо видна ефективність проведення оновлень ПС, так як після 3000 часов роботи происходит превышение функции готовности многофрагментной модели над коэффициентом готовности однофрагментной модели. Значение параметра $\lambda_{\text{чр}}$ одновременно влияет на минимум функции готовности и на скорость перехода ее в стационарный режим (кривые (г) и (д) на рис.5). В то же время значение параметра $\mu_{\text{чр}}$ практически не влияет на скорость перехода функции готовности в стационарный режим (кривые (б), (в) и (г) на рис. 5 переходят в стационарный режим на одном и том же временном промежутке).

Выводы

Анализ полученных результатов моделирования готовности ИУС обслуживаемого космического аппарата при проведении оновлений ПС позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Для ускорения перехода функции готовности в стационарное состояние необходимо повышать значения параметров $\Delta\lambda_{\text{sw}}$ и $\lambda_{\text{чр}}$, то есть более часто проводить процедуры оновления ПС и стараться устранить большее количество программных дефектов за одно оновление.

2. В начальный период эксплуатации готовность систем, в которых предусмотрено оновление ПС, ниже, чем у систем без устранения дефектов ПС.

3. Повысить готовность систем на начальном периоде эксплуатации можно, увеличив значение параметра $\mu_{\text{чр}}$, то есть, ускорив восстановление работоспособного состояния системы.

Планируется включить разработанную модель и полученные результаты в комплексную методику выбора и обоснования параметров стратегии проведения процедур оновления и верификации ИУС КА.

Список литературы

1. ECSS-Q-40B-2002 *Space product assurance. Safety (Гарантия продукции космического назначения. Безопасность)*. – Нордвик: Европейская комиссия по космической стандартизации, 2002. – 42 с.
2. *Experimenting With Exception Handling Mechanisms Of Web Services Implemented Using Different Development Kits* / A. Gorbenko, A. Mikhaylichenko, V. Kharchenko, A. Romanovsky // CS-TR 1010, University of Newcastle upon. – Tyne, 2007. – P. 67-78.
3. Rotaru T. *Service-oriented middleware for financial Monte Carlo simulations on the cell broadband engine* / T. Rotaru, M. Dalheimer, F.-J. Pfreundt – *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, John Wiley & Sons, Ltd. – 2009. – 348 p.
4. Gashi I. *Uncertainty Explicit Assessment of Off-The-Shelf Software: A Bayesian Approach* / I. Gashi, P. Popov, V. Stankovic // *Elsevier Journal of Information and Software Technology*, Elsevier. – 2009. – 51(2). – P. 497-511.
5. Chan P. *Making Services Fault Tolerant* / P. Chan, M. Lyu, M. Malek // ISAS 2006, LNCS 4328. – 2006. – P. 43-61.
6. Харченко В.С. *Базовые многофрагментные макро-модели 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.
7. Одаруценко О.Н. *Применение численных методов для решения жестких систем линейных дифференциальных уравнений в задачах оценки надежности обслуживаемых систем* / О.Н. Одаруценко, Е.Б. Одаруценко, Ю.Л. Поночовный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – X.: Национальный аэрокосмический университет „ХАИ”, 2002. – Вып. 35. – С. 187-191.

Поступила в редколлегию 8.10.2011

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ОНОВЛЕННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ НА ГОТОВНІСТЬ ДВОКАНАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЮЧОЇ СИСТЕМИ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ

С.О. Засуха

У статті розглянута багатofрагментна модель інформаційно-управлючої системи космічного апарату, що обслуговується. При побудові моделі враховані проведення оновлення програмних засобів в процесі експлуатації системи, а також усунення виявлених програмних дефектів. За результатами моделювання зроблені висновки щодо способів визначення оптимальних часових параметрів проведення оновлення програмних засобів.

Ключові слова: багатofрагментне моделювання, усунення програмних дефектів, оновлення програмних засобів.

RESEARCH OF SOFTWARE UPDATING TIME PARAMETERS EFFECT ON AVAILABILITY OF THE SPACE TWO-CHANNEL INFORMATION-CONTROL SYSTEM

S.A. Zasuha

In article it is described multi-fragment model of the manned space informational-control system. At model construction, Software updating and elimination of detected design faults in operation of space system were taken into account. Propositions concerning definition of optimum time parameters of software updating are formulated by use of modeling results.

Keywords: multi-fragment design, removal of programmatic defects, update of programmatic facilities.