

УДК 681.321

Ю.Л. Поночовный<sup>1</sup>, А.В. Боярчук<sup>2</sup>, В.С. Харченко<sup>2</sup><sup>1</sup> Полтавский национальный технический университет имени Ю. Кондратюка, Полтава<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

## МНОГОФРАГМЕНТНЫЕ МАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ WEB-СЕРВИСОВ С УСТРАНЕНИЕМ ПРОЕКТНЫХ ДЕФЕКТОВ

*В статье обсуждаются модели отказоустойчивых систем Web-сервисов при устранении проектных дефектов. Определены множества состояний Web-сервиса для базовых моделей. Проанализирован процесс моделирования отказоустойчивой сервис-ориентированной Web-системы, включающий построение макрографа, параметризацию (определение входных параметров и границ их изменений), построение расширенного орграфа модели и системы дифференциальных уравнений, а также исследование зависимостей функции готовности от изменения входных параметров модели. Полученные результаты позволили выделить допустимые области изменения входных параметров: вероятности устранения выявленных дефектов и интенсивности профилактик для обеспечения готовности.*

**Ключевые слова:** Web-сервис, многофрагментная марковская модель, функция готовности.

### Введение

**Постановка задачи.** Web системы с сервис-ориентированной архитектурой (SOA) в настоящее время широко внедрены в сферу бизнес-критических приложений, среди которых следует отметить Интернет-банкинг и магазины, системы электронного бизнеса и науки. В различных исследованиях [1, 2] предложены подходы к обеспечению отказоустойчивости Web-сервисов. Однако разработка и внедрение отказоустойчивых архитектур требует построения адекватных и точных моделей оценки надежности:

- в отказоустойчивых сервисах растет число состояний, в которых может находиться система вследствие отказов, обусловленных дефектами аппаратного и программного обеспечения, дефектами взаимодействия Web-сервисов вследствие различных атак;

- для каждой из процедур обеспечения отказоустойчивости необходимо учитывать влияние средств их реализации на надежность Web-сервисов;

- характеристики SOA и целевых сервисов являются изменяющимися.

Известны несколько подходов к моделированию Web-сервисов, основанные на экспериментировании с реальными сервисами [3], методе Монте-Карло [4], аналитических методах исследования марковских систем [5]. Использование аппарата марковских или полумарковских процессов является предпочтительным подходом, поскольку позволяет систематизировать сам процесс моделирования (определение множества состояний, переходов между ними и интенсивностей переходов). Однако использование этого подхода в Web-сервисах ограничива-

ется рядом особенностей различных вариантов SOAs, их функционирования при отказах вызванных разными дефектами.

**Целью** данного исследования является разработка и анализ базовых многофрагментных моделей Web-сервисов. Предложена методика построения модели на основе определения компонентов системы, множеств состояний и механизмов взаимодействия.

Для оценки функции готовности выполнены расчет и исследования многофрагментной модели Web-сервиса в среде Matlab. Определены срезы входных параметров модели, про которых обеспечивается заданный уровень готовности.

### 1. Теоретико-множественная модель отказоустойчивых Web-сервисов

Для построения моделей были определены следующие множества состояний функционирования Web-сервиса.

$M_{S_0}$  – множество основных (функциональных) состояний, при которых Web-сервис выполняет заданные функции. Переходы между состояниями множества  $M_{S_0}$  ( $M_{S_0}^*$ ) осуществляются последовательно. После перехода в последнее из состояний  $S_{0+n}$  множества  $M_{S_0}^*$  осуществляется переход в начальное состояние  $S_{01}$  множества  $M_{S_0}^*$ .

$M_{S_0}^*$  – подмножество основных состояний, в которых непосредственно реализуется запрос на выполнение сервиса,  $M_{S_0}^* \subset M_{S_0}$ . Под состоянием активной готовности понимаются работоспособные состояния в множестве множества  $M_{S_0}^*$ .

$M_F$  – множество состояний отказа или сбоя однокомпонентного Web-сервиса, в которое система переходит и находится до начала процедур восстановления.

В событиях  $S_{Fk} \in M_{SF}$  система переходит из состояний  $S_{0*j} \in M_{S0}^*$ . Соответствие между состояниями этих двух множеств (возможные переходы  $S_{0*j} \Rightarrow S_{Fk}$ ) задается отображением:

$$\Omega_{0*F}: M_{S0}^* \Rightarrow M_{SF}. \quad (1)$$

$M_R$  – множество состояний, в которых осуществляется процесс восстановления:

$$M_R = \{S_{Rl}\}, l = 1, \dots, r. \quad (2)$$

Они характеризуются тем, что причина отказа или сбоя идентифицирована с некоторой точностью (разрешающей способностью) и в соответствии с этим инициирована процедура восстановления.

Соответствие между состояниями  $S_{Fk} \in M_{SF}$  и  $S_{Rl} \in M_R$ , а также переходы задаются отображением:

$$\Omega_{FR}: M_{SF} \Rightarrow M_{SR}. \quad (3)$$

Вид отображения определяется тем, какие процедуры используются для восстановления после данного отказа. Если отказ требует изменения про-

граммного модуля с целью исправления дефектов проектирования, что приводит к изменению параметров системы, то система переходит в состояние  $S_{SW}$ , что описывается отображением:

$$\Omega_{RSW}: M_{SRSW} \Rightarrow S_{SW}, M_{SRSW} \subset M_{SR}. \quad (4)$$

Из этого состояния осуществляется переход в состояние  $S_{01}$ . Однако, с учетом того, что в данном случае будет иметь место изменение параметров системы, состояние  $S_{01}$  должно принадлежать множеству новых состояний  $M_{S0(1)}$ . Структура этого множества и других множеств  $M_{S0}^*$ ,  $M_{SF}$ ,  $M_{SR}$  и отображений  $\Omega_{RSW}$  не меняется. В соответствии с работами [5, 6], модель с такими множествами состояний называется многофрагментной. При определенных условиях она описывается вложенной марковской цепью. В разрабатываемой модели также имеют место начальный, внутренние и конечный фрагменты при условии, что общее число устраняемых дефектов равно  $m+1$  (рис. 1).

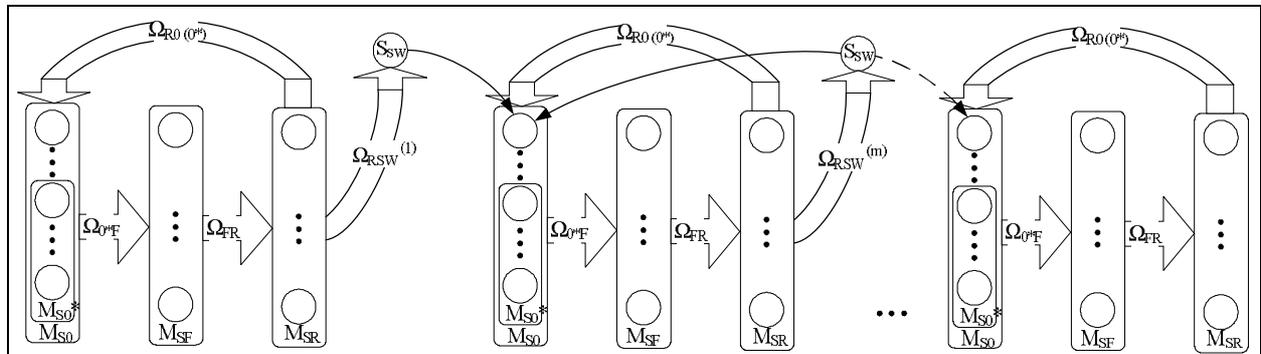


Рис. 1. Многофрагментная модель Web-сервиса

От фрагмента к фрагменту в рамках рассматриваемого подхода изменяется только отображение  $\Omega_{RSW(p)}$ ,  $p = 1, \dots, m$ . Суть изменения связана с тем, что по мере устранения дефектов программных компонентов, изменяются параметры потоков отказов и исключаются некоторые переходы.

Следует отметить, что множество состояний  $M_{SF}$  определяется таксономией отказов, обусловленных дефектами физическими, проектирования и взаимодействия.

Учитывая специфику отказов, обусловленных информационными воздействиями, для них могут быть выделены отдельные группы состояний  $M_{SFsec}$ ,  $M_{SRsec}$ . Им соответствуют отображения  $\Omega_{0Fsec}$ ,  $\Omega_{FsecRsec}$ . Число фрагментов может определяться, исходя из возможного количества уязвимостей и компонент SOA [6].

В том случае, когда при профилактике устраняются физические дефекты, Web-сервис может перейти в состояние  $S_{HW}$ ; если устраняются проектные дефекты – в состояние  $S_{SW}$ ; дефекты взаимодействия, связанные с устранением дефектов, – в состояние  $S_{SEC}$ .

Эти переходы описываются отображениями  $\Omega_{\Pi(2)HW}$ ,  $\Omega_{\Pi(2)SW}$ ,  $\Omega_{\Pi(2)SEC}$ .

## 2. Многофрагментная марковская модель Web-сервиса

Рассмотрим процесс моделирования отказоустойчивой сервис-ориентированной веб-системы на примере системы [6].

Обобщенный граф модели содержит множество состояний  $MS$ , которое разбито на группы: группа работоспособных состояний  $\{qInit; WaitR; GetR+Decompose; SendR; CollectR + Check; isOk + SendOK\}$ , группа неработоспособных состояний  $\{F1, \dots, F8\}$ , группа состояний восстановления  $\{R1, \dots, R8\}$  и одно состояние профилактики и обновления ПС.

Согласно [5, 6] данную систему можно описать многофрагментным марковским графом, переходы между фрагментами которого соответствуют процессам патчеризации моделируемого Web-сервиса. Многофрагментный граф системы можно представить в виде детализированного орграфа, включающего основные типы фрагментов (рис. 2).



Логика функционирования Web-сервиса следующая. На промежутке существования одного фрагмента модель системы идентична модели ВМ1 [6] за исключением перехода из состояния S22 в состояние S0 (определяется параметром  $\mu_r * P_{нк}$ ). После проведения профилактики в случае обнаружения и устранения уязвимости (вероятность этого события составляет  $1 - P_{нк}$ ) изменяются параметры  $\lambda_4, \lambda_6, \lambda_7$  (уменьшаются на величину  $\Delta\lambda$ ) и Web-сервис с интенсивностью  $\mu_r$  переходит в новый фрагмент F1 (F2, F3...). Процесс смены фрагментов модели продолжается до полного устранения всех уязвимостей модели. Однако, в условиях применения современного программного обеспечения с большим объёмом исходного кода, процесс устранения всех уязвимостей может занять срок, превышающий срок эксплуатации системы, поэтому в этой работе рассматривается модель с ограниченным набором фрагментов.

Функция готовности определяется как сумма вероятностей нахождения системы в работоспособных состояниях  $S_{раб} = \{S_0, \dots, S_5; S_{23}, \dots, S_{28}; S_{46}, \dots, S_{51}\}$ .

$$A(t) = \sum_{i=0}^{N_{fr}} \left[ \sum_{j=0}^6 P_{23i+j}(t) \right]. \quad (5)$$

### 3. Результаты исследования модели

Для исследования поведения системы при различных значениях управляемых параметров, в модели были приняты следующие постоянные исходные данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1  
Постоянные значения параметров марковской модели Web-сервиса

$\lambda$	Значение (1/час)	$\mu$	Значение (1/час)
$\lambda_1$	$10^{-5}$	$\mu_1$	0,5
$\lambda_2$	$10^{-4}$	$\mu_2$	1,429
$\lambda_3$	$5 * 10^{-3}$	$\mu_3$	8,571
$\lambda_4$	$5 * 10^{-4}$	$\mu_4$	2,4
$\lambda_5$	$9 * 10^{-4}$	$\mu_5$	15
$\lambda_6$	$3 * 10^{-3}$	$\mu_6$	6
$\lambda_7$	$2 * 10^{-3}$	$\mu_7$	20
$\lambda_8$	$9 * 10^{-4}$	$\mu_8$	0,6
$\Delta\lambda$	$3 * 10^{-5}$	$\mu_r$	0,5
$P_{нк}$	0,8		

Для ряда входных параметров были приняты интервальные оценки, что позволило исследовать динамику поведения системы. Границы изменения этих параметров и их значения по умолчанию указаны в табл. 2. Интенсивности обработки заявок Web-сервисом  $\rho_1 - \rho_7$  при отсутствии задержек в обслуживании равны. Интенсивности профилактики  $\lambda_r$  и  $\mu_r$  рассчитываются следующим образом:  $\mu_r = \text{MIN}(\mu_1 \dots \mu_8) = \mu_1 = 0,5$  (1/час);  $\lambda_r$  будет зависеть от частоты проведения профилактики, например: про-

филактика проводится раз в неделю –  $T_r = 7 * 24 = 168$  часов,  $\lambda_r = 0,00595$  (1/час); профилактика проводится раз в два дня –  $T_r = 2 * 24 = 48$  часов,  $\lambda_r = 0,02083$  (1/час); профилактика проводится раз в сутки –  $T_r = 24$  часа,  $\lambda_r = 0,0417$  (1/час).

Таблица 2  
Переменные значения параметров марковской модели Web-сервиса

Параметр	Интервал изменения	Значение по умолчанию
$\rho_1 - \rho_7$	0,1...100000	32000 (1/час)
D	0...1	0,8
$\lambda_r$	0,00595...1	0,00595 (1/час)

На рис. 3 представлены результаты сравнения разработанной многофрагментной модели с результатами однофрагментной модели без учета устранения проектных дефектов [6].

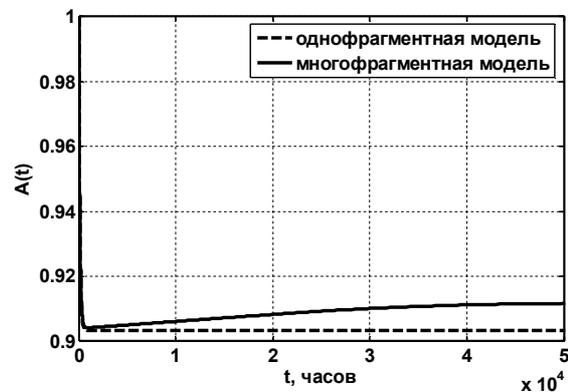


Рис. 3. Графики функции готовности одно- и многофрагментной моделей Веб-сервиса

При принятых значениях входных параметров, функция готовности однофрагментной модели принимает устоявшееся значение  $A = 0,9064$  в течение первых 200 часов функционирования. Соответственно, если не устранять выявленные программные дефекты, то система никогда не достигнет требуемого уровня готовности (в данном случае он принят равным 0,91). Этот уровень примерно через 35000 часов достигнет функция готовности системы с устранением дефектов.

Результаты исследования влияния переменных входных параметров на готовность системы приведены на рис. 4 – 6.

Увеличение интенсивности пользовательских запросов ( $\rho_1 - \rho_7$ ) на несколько порядков (рис. 4) практически не влияет на готовность системы, так как вызывает равномерное перераспределение вероятностей начальных состояний между P1, P2, P3 и P5. вероятность нахождения системы в исходном состоянии P0 при увеличении  $\rho_1 - \rho_7$  будет стремиться к нулю. Так как функция готовности на трехмерном графике (рис. 4) не изменяется с ростом параметров  $\rho_1 - \rho_7$ , принято решение не строить его срез по уровню 0,91.

Анализ данных на рис. 5 привел к ожидаемому результату – с увеличением полноты контроля  $D$  вероятность нахождения системы в состоянии скрытых отказов будет стремиться к нулю, вследствие

чего увеличится готовность системы в целом. При этом наблюдается практически линейная зависимость коэффициента готовности от величины полноты контроля.

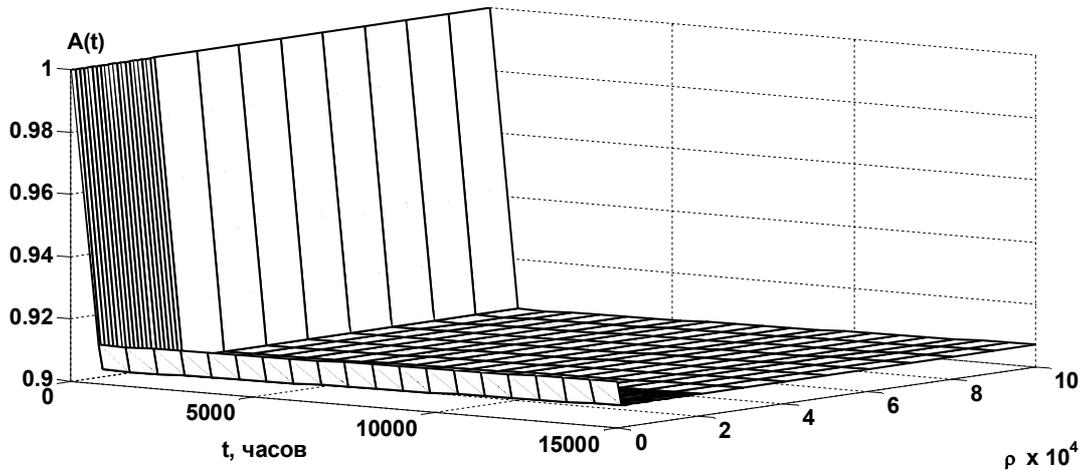


Рис. 4. График функции готовности модели веб-сервиса при различной интенсивности запросов  $\rho$

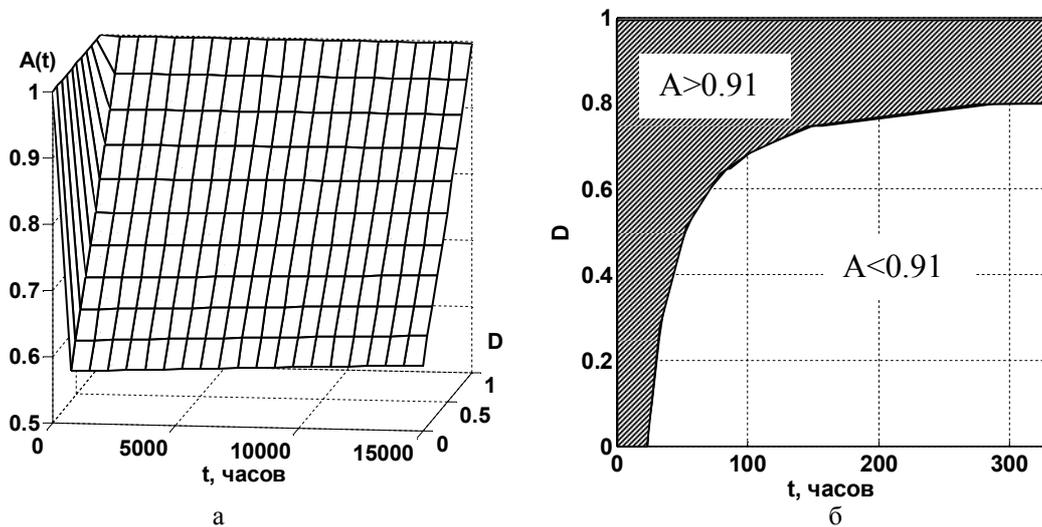


Рис. 5. График функции готовности модели веб-сервиса при различной вероятности устранения выявленных дефектов  $D$  (а) и его срез по уровню  $A=0,91$  (б)

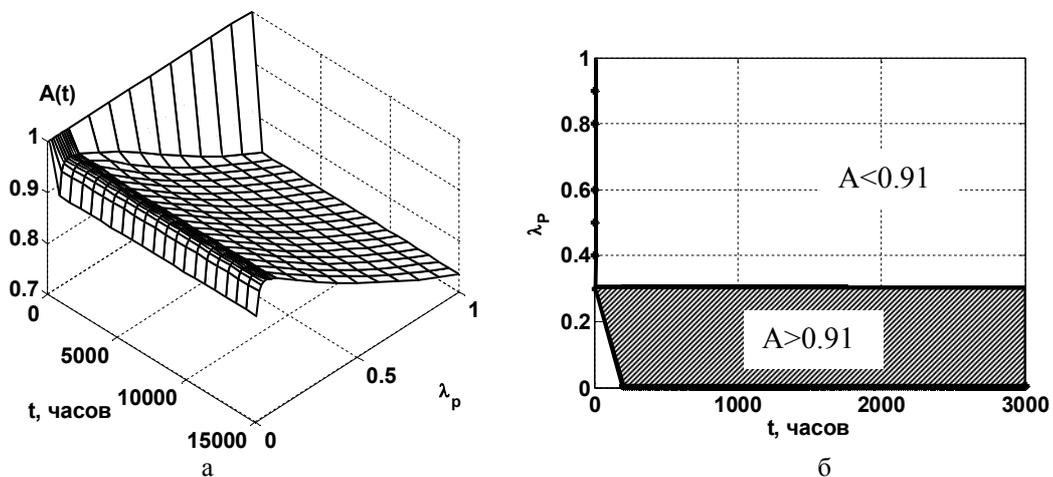


Рис. 6. График функции готовности модели веб-сервиса при различной интенсивности профилактик и обновлений  $\lambda_p$  (а) и его срез по уровню  $A=0,91$  (б)

Срез по уровню 0,91 (рис. 5, б) хорошо иллюстрирует, что данный уровень готовности обеспечивается на всем временном интервале эксплуатации веб-сервиса при вероятности устранения выявленных дефектов  $D > 0.8$ .

Анализ данных на рис. 6 показал, что увеличение интенсивности проведения профилактики  $\lambda_p$  позволяет эффективно бороться со скрытыми отказами до определенного момента, после которого основным фактором неготовности становится нахождение системы в состоянии профилактики S22. Соответственно, для определенного набора значений параметров системы существует оптимальное значение  $\lambda_p$ , при котором система имеет максимальную готовность. Как видно из рис. 6, б, заданный уровень готовности обеспечивается для всех значений  $\lambda_p$ , в интервале [0.01...0.3] (1/час).

### Выводы

В статье предложены модели отказоустойчивых Web-сервисов, в которых устраняются выявляемые дефекты. Для исследования следует выбрать базовую модель, детализировать марковский граф и уточнить данные для моделирования.

Изменение характеристик Web-сервисов (варьирование интенсивностей отказа и восстановления путем устранения дефектов проектирования, использования патчей и снижения вероятности дефектов взаимодействия и т.д.) может быть учтено, используя принцип многофрагментности [6].

Результаты моделирования показали, что наиболее эффективными методами повышения надежности сервис-ориентированной системы являются повышение достоверности контроля и снижения

рисков скрытых отказов, а также оптимизация периодичности профилактики для выявления скрытых отказов и обновления системы.

### Список литературы

1. Papazoglou M.P. *Web Services: Principles and Technology* / M.P. Papazoglou // Prentice Hall. – 2007. – Vol. 21. – P. 139-145.
2. Chan P. *Making Services Fault Tolerant* / P. Chan, M. Lyu, M. Malek, D. Penkler, M. Reitenspiess, F. Tam // ISAS 2006, LNCS 4328, 2006. – P. 43-61.
3. Gorbenko A. *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. 254-257.
4. 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. – 280 p.
5. Kharchenko V. *Web Systems Availability Assessment Considering Attacks on Service Configuration Vulnerabilities* / V. Kharchenko, Alaa Mohammed Ab-dul-Hadi, A. Boyarchuk, Y. Ponochovny / *Seria "Advances in Intelligent Systems and Computing"*, Vol.286, / W. Zamojski et al (eds), Springer International Publishing Switzerland, 2014. – P. 275-284.
6. *Технологии Web, Grid, Cloud для гарантоспособных ИТ-инфраструктур. Том 1. WEB* / Под ред. В.С. Харченко, А.В. Горбенко. – Министерство образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковско-го «ХАИ», 2013. – 478 с.

Поступила в редколлегию 29.07.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.М. Конорев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### БАГАТОФРАГМЕНТНІ МАРКОВСЬКІ МОДЕЛІ ВІДМОВСТІЙКИХ WEB-СЕРВІСІВ З УСУНЕННЯМ ПРОЕКТНИХ ДЕФЕКТІВ

Ю.Л. Поночовний, А.В. Боярчук, В.С. Харченко

У статті обговорюються моделі відмовостійких систем Web-сервісів при усуненні проектних дефектів. Визначено множини станів функціонування Web-сервісу для так званих базових моделей. Проаналізовано процес моделювання відмовостійкої сервіс-орієнтованої Web-системи, що включає побудову макрографа, параметризацію (визначення вхідних параметрів і меж їх змін), побудову розширеного орграфа моделі та системи диференціальних рівнянь, а також дослідження залежностей функції готовності від зміни вхідних параметрів моделі. Отримані результати дозволили виділити допустимі області зміни вхідних параметрів: ймовірності усунення виявлених дефектів та інтенсивності профілактик для забезпечення фіксованого рівня функції готовності.

**Ключові слова:** Web-сервіс, багатофрагментна марковська модель, функція готовності.

### MULTIFRAGMENTAL MARKOV MODELS OF FAULT-TOLERANT WEB-SERVICES WITH THE REMOVAL DESIGN FAULTS

Y.L. Ponochovniy, A.V. Boyarchuk, V.S. Kharchenko

The paper discusses the model of fault-tolerant systems Web-services with the removal design faults. Defined set of states Web-service operation for basic models. The process of modeling a fault-tolerant service-oriented Web-system is analyzed, which includes design of macrograph, parameterization (definition of input parameters and their limits), design of oriented graph and systems of differential equations, as well as the study of dependencies on the availability function of input parameters. The results obtained allowed to identify the allowable range of the input parameters: probability of eliminating the identified faults and maintenance rate to ensure a required level availability function.

**Keywords:** Web-service, multifragmental Markov's model, availability function.