

УДК 681.3+004.73.052

В.С. Харченко¹, В.О. Бутенко¹, О.Н. Одарущенко²

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

² *НПП «Радий», Кировоград, Украина*

МЕТРИКО-ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

В статье рассматривается процесс построения метрико-интервальных моделей, а также алгоритм выбора инструментальных средств для оценивания готовности информационно-управляющих систем с использованием марковских процессов. Представленные метрико-интервальные модели применяются для выбора техники решения марковских моделей надежности информационно-управляющих систем с целью уменьшения риска проведения неточных расчетов показателей готовности систем важных для безопасности.

Ключевые слова: *марковские модели, метрики, метрико-интервальные модели, жесткость, фрагментность, разреженность, разложимость, инструментальные средства*

Введение

Оценка надежности информационно-управляющих систем (ИУС) важных для безопасности является обязательным этапом процесса их разработки и сертификации, в связи с повышенными требованиями к показателям надежности функционирования данных систем. Повышение требований связано с областью применения ИУС, так например ИУС используемые на АЭС выполняют функции получения, обработки, хранения, передачи, отображения, регистрации данных о состоянии и функционировании систем, элементов конструкций контролируемого объекта, а также такие управленческие функции как инициация срабатывания технологиче-

ских систем при нарушении заданных проектных пределов или условий эксплуатации [1].

Увеличение сложности ИУС приводит к трудностям выбора и применения инструментария (техник, подходов, методов и средств компьютерного моделирования), позволяющего с требуемым уровнем точности вычислять показатели надежности (готовности). Учитывая то, что параметры ИУС (например, интенсивности потока отказов и восстановлений программных средств) могут изменяться, приводит к значительному росту размерности модели исследуемой системы [2].

Исходя из этого, процесс моделирования характеризуется рядом рисков: *точности* – несоответствия фактически достигнутого значения точности результа-

тов требуемому значению, что приводит либо к необоснованному увеличению затрат, либо невыполнению требований по готовности; *устойчивости* – нестабильности результатов и принятия необоснованных решений на их основе; *ресурсов* – использования неприемлемого объема временных и вычислительных ресурсов. Также необходимо отметить, что неточная оценка показателей надежности ИУС на этапе моделирования системы, может привести к использованию дополнительных вычислительных и энергетических ресурсов. Множество методов математического моделирования применяющихся для проведения анализа надежности ИУС может быть разделено на три категории: аналитические методы, имитационные и гибридные [3]. В свою очередь аналитические методы делятся на пространственные (марковские цепи, PTN, SAN и т.д.) и комбинаторные (FTA, RBD и т.д.) Одним из наиболее распространенных подходов аналитического моделирования является аппарат марковского анализа, позволяющий гибко отображать такие свойства моделируемых систем как зависимости отказов и восстановлений, функции горячей замены, общий ресурс восстановления и т.д. [4].

В процессе использования аппарата марковского анализа исследователь может столкнуться с рядом таких вычислительных сложностей как ростом пространства состояний, разреженностью матрицы интенсивностей переходов между состояниями марковской модели (ММ), жесткостью и разложимостью ММ [5].

Общее множество подходов к исследованию ММ и последующему решению системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена может быть разделено на две группы: прямые (ПР) техники и техники преобразования моделей (НПР). Первый вид характеризуется применением устойчивых численных методов для нахождения как стационарных так и переходных вероятностей, а также использованием специальных структур для хранения больших разреженных матриц. В основе непрямого подхода лежит идея трансформирования исходной ММ, путем исследования ее структуры и укрупнения состояний, с целью снижения жесткости и размерности модели. Разработанное множество техник и методов решения МЦ покрывает каждую из указанных вычислительных сложностей в отдельности, но не всегда рассматривает возможное присутствие двух и больше сложностей одновременно.

За последние 30 лет было разработано множество программных средств (ПС) реализующих каждую из перечисленных техник, которое может быть разделено на три группы: специализированные ПС (λ Predict, Möbius, SHARP), коммерческие математические пакеты (Maple, Matlab, Mathematica) и ПС частной разработки (MSMC, ExpMeth, ASNA, MARCA), т.е. утилиты разработанные пользователями для решения ряда узкоспециализированных

задач и которые прошли проверку на множестве ранее проведенных исследований [6].

Такое разнообразие ПС является чрезвычайно полезным в процессе моделирования системы, однако может привести к значительным сложностям при выборе наиболее применимого для решения конкретной задачи с точки зрения точности и удобства использования. Ранее проведенные исследования показали, что в случае решения жестких ММ с малой размерностью, используя идентичные исходные данные, а также единый метод решения СДУ, но различные пакеты компьютерной математики, результирующие значения отличались в 10^{-4} знаке [6]. Таким образом для достижения требуемой точности необходимо уделять повышенное внимание как процессу построения модели, так и процессу выбора эффективной техники (метода) решения и ПС. Однако данное утверждение идет вразрез с рекомендациями представленными в одном из базовых стандартов в отрасли безопасности – ИЕС 61508 [7], где определяется, что эффективные алгоритмы решения СДР были разработаны достаточно давно, и использование как специализированных так и универсальных программных средств возможно без акцентирования внимания на математических аспектах решения. Разработка методики позволяющей на основе анализа таких характеристик ММ как сложность, разреженность, жесткость и фрагментность обоснованное усечь множество непродуктивных методов позволит повысить результативность проводимого исследования, а также увеличить уровень доверия к выходным результатам.

В данной статье представлена метрико-интервальная модель, базирующаяся на определении и использовании данных характеристик, с целью поддержки процесса принятия решения по выбору методов интегрирования, обеспечивающих требуемую точность результатов. Также представлен алгоритм последовательности выбора инструментальных средств исходя из результатов анализа метрико-интервальной модели.

1. Построение метрико-интервальной модели

А. Расчет метрики фрагментности. Использование данной метрики основывается на введении допущения о изменении параметров отказов подсистем, обусловленных проектными дефектами. Оно базируется на использовании *принципа многофрагментности* [2], который заключается в представлении моделей надежности системы в виде совокупности повторяющихся фрагментов, отличающихся одним или несколькими параметрами.

Число фрагментов $N_{\text{ф}}$ в рассматриваемой модели принимается как основная метрика фрагментности, позволяющая оценить размерность модели до ее построения.

Рассматривается метрическая шкала в интервале [0; 30], где граничное значение 0 определяет отсутствие фрагментов в исходной ММ (рис. 1). Общий интервал разделен на три части, каждый из которых описывает степень проявления характеристики фрагментности: малая [0; 6), средняя [6; 15], высокая фрагментность (15; 30]. Количественные значения N_{fr} нормированы следующим образом:

$$n_i = \frac{x_i - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}, \quad (1)$$

где n_i – нормированное на интервале [0; 1] значение метрики фрагментности N_{fr} , x_i – исходное значение метрики N_{fr} , $x_i^{\min} = 0$ и $x_i^{\max} = 30$.

На рис. 1 использованы следующие условные обозначения: DR – прямая техника (direct technique); IDR – техника преобразования (indirect technique); Ar_m , где $Ar = \{DR, IDR\}$, m – индекс определяющий основной подход; Ar_v , где $Ar = \{DR, IDR\}$, v – индекс определяющий проверочный подход решения.

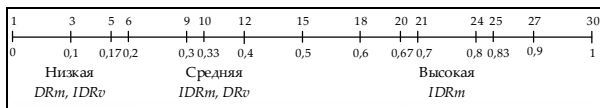


Рис. 1. Метрическая шкала фрагментности

Б. Расчет метрики жесткости. Жесткость является нежелательным свойством ММ приводящим к значительным трудностям в случае численного решения СДУ Колмогорова-Чепмена. Жесткость в ММ возникает в случае моделирования:

- восстанавливаемых систем, так как зачастую количественные значения интенсивностей отказов и восстановлений моделируемых компонентов отличаются в несколько порядков;

- отказоустойчивых систем с аппаратной избыточностью – количественные значения интенсивностей отказа отдельных компонент значительно выше интенсивностей одновременного отказа основных и резервных компонент;

- надежности модульного ПО, так как количественное значение интенсивности отказа отдельного модуля значительно ниже, чем интенсивность отказа ПО в процессе передачи управления с одного рассматриваемого модуля на другой [8].

Коэффициент жесткости СДУ является базовой метрикой свойства жесткости. Данный показатель позволит автоматически обнаружить жесткость в исследуемой системе СДУ, а также определить степень данного свойства. Задача Коши $du / dx = F(x, u)$ называется жесткой на некотором интервале $[x_0, X]$, если для каждого x из данного интервала выполняются такие условия [9]:

$$\operatorname{Re} \lambda_i < 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$s(x) = \max_{i=1,n} \operatorname{Re}(-\lambda_i) / \min_{i=1,n} \operatorname{Re}(-\lambda_i) \gg 1, \quad (3)$$

где λ_i – собственные числа матрицы Якоби, рассчитанные на произвольном частном решении. Величину $s(x)$ также называют коэффициентом жесткости.

Экспериментальные исследования показали, что путем использования формулы (2) количественные значения коэффициента жесткости могут быть априорно разделены на три группы: $s(x) \leq 10^2$ – малая жесткость; $10^2 < s(x) < 10^4$ – средняя жесткость; $s(x) \geq 9 \cdot 10^3$ – высокая жесткость. На рис. 2 представлена метрическая шкала характеристики жесткости. Значения $s(x)$ нормируются с помощью (1), при $x_i^{\min} = 0$ и $x_i^{\max} = 10^4$.



Рис. 2. Метрическая шкала жесткости

В. Расчет метрики разложимости. Метрика разложимости характеризует МЦ, в которых общее множество состояний может быть разделено на такие подмножества, что количество связей в данных подмножествах значительно превышает количество связей между ними. Также, кроме количества связей между подмножествами, данная метрика учитывает их численные значения. Таким образом, рассматривая матрицу интенсивностей, если численные значения ненулевых элементов матрицы, находящиеся вне диагональных блоков значительно меньше сравнительно с численными значениями элементов в диагональных блоках, МЦ определяется как практически полностью разложимая (ППР). Полностью разложимая МЦ (ПР МЦ) описывается строго диагонально-блочного вида матрицей. Пусть ППР МЦ описывается следующей матрицей:

$$A = (A_{ij}) \quad (4)$$

где A_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$ – квадратные диагональные блоки.

Стационарное распределение π может быть разделено так, что $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$. Допустим, что A можно представить в виде

$$A = \operatorname{diag}(A_{11}, A_{22}, \dots, A_{nn}) + E \quad (5)$$

где E содержит в себе все внедиагональные блоки. Таким образом метрика разложимости матрицы (4) описывается выражением [10]:

$$\|E\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |e_{ij}|. \quad (6)$$

На рис. 3 представлена нормированная метрическая шкала характеристики жесткости.

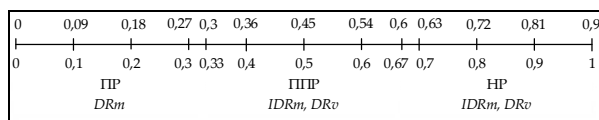


Рис. 3. Метрическая шкала разложимости

Г. Расчет метрики разреженности. В результате исследований была введена эвристическая мера разреженности матрицы, т.н. индекс разреженности (matrix score) который позволяет численно измерить удаленность ненулевых элементов от главной диагонали. В данной работе именно значение индекса разреженности используется как базовая метрика разреженности системы. Пусть q_i является количеством элементов матрицы, расположенных на расстоянии i от главной диагонали. Тогда индекс разреженности определяется как (7):

$$\text{matrixScore} = \sum_{i=1}^{n-1} (i \cdot q_i) / n^2, \quad (7)$$

где n – размерность матрицы. Ранее проведенные исследования показали [11], что в случае превышения индексом разреженности значения 0,8 ($\text{matrixScore} > 0.8$) применение не прямых методов решения СДУ становится желательным для обеспечения высокой точности полученных результатов. Данный результат позволяет априорно классифицировать матрицу, описывающую исследуемую МЦ как такую которая имеет высокую разреженность, т.е. содержит крайне малый процент ненулевых элементов, умеренную либо низкую разреженность. На рис. 4 представлена шкала нормированных значений (1) метрики разреженности, где граничное значение 0 описывает высокую разреженность и характерно для симметрической диагональной формы матрицы, а 0,9 – определяет низкую разреженность, зачастую описывающую ассиметричный почти блочно-диагональный тип матрицы.

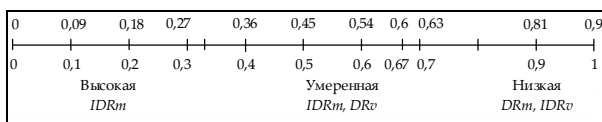


Рис. 4. Метрическая шкала разреженности

Д. Метрико-интервальная модель. На рис. 5 представлена метрико-интервальная модель, позволяющая сформировать рекомендации по выбору техники (метода) решения исходной ММ основываясь на полученных количественных значениях метрических характеристик: N_{fr} , $s(x)$, E и matrixScore .

Данная модель содержит в себе 20 блоков, каждый из которых определяет техники решения ММ при нормированных количественных значениях метрик, полученных на предыдущем этапе. Выделенные сектора определяют необходимость использования прямого либо непрямого метода эффективного в условиях жесткости СДУ.

2. Алгоритм выбора инструментальных средств

Основываясь на полученных рекомендациях по выбору техники (метода) исследования ММ был разработан алгоритм выбора инструментального средства в процессе оценивания готовности ИУС (рис. 6).

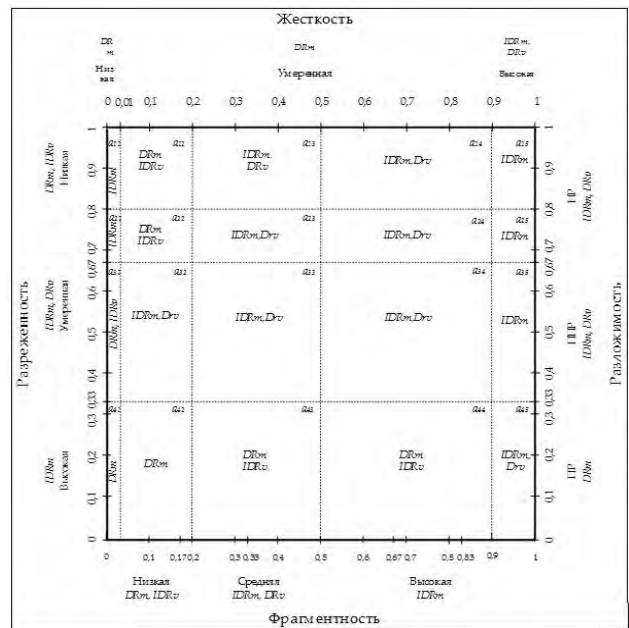


Рис. 5. Метрико-интервальная модель ММ

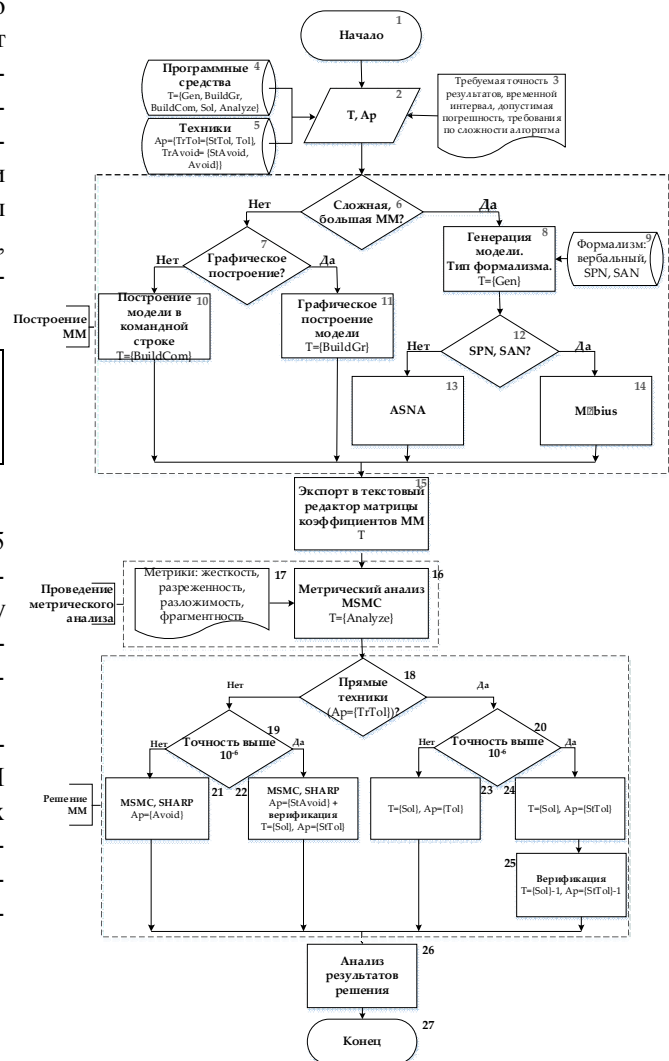


Рис. 6. Алгоритм выбора инструментального средства при построении и анализе ММ, а также проведении метрического анализа с помощью метрико-интервальных моделей

На рис. 6 были использованы следующие сокращения:

- Ap – техники исследования ММ;
- TrTol – прямая техника исследования ММ;
- StTol – прямые методы для решения жестких ММ;
- Tol – прямые методы для решения нежестких ММ;
- TrAvoid – техника преобразования ММ;
- StAvoid – техники преобразования для решения жестких ММ;
- Avoid – техника преобразования для решения нежестких ММ;
- T – ПС для построения и решения ММ;
- Gen – ПС для генерирования ММ;
- BuildGr – ПС для графического построения ММ;
- BuildCom – ПС для матричного построения ММ;
- Sol – ПС для решения ММ;

Analyze – ПС для анализа ММ.

Приведем описание одного из рассматриваемых в алгоритме классов инструментальных средств – ПС для построения ММ.

Существует два пути построения модели – ручное либо генерирование пространства состояний. Так как зачастую увеличение уровня детализации модели сопровождается экспоненциальным ростом пространства ее состояний, построение модели вручную становится практически не возможным. Ручное построение может результировать в таких типичных ошибках как опечатка в процессе расстановки количественных значений связей между состояниями, тем самым внести некорректную информацию в исследуемую модель и повлиять на точность результата.

Таблица 1

Анализ функций для построения и работы с ММ в существующих ПС

Функция	ПС								
	SHARP	ToolKit Markov	MARCA	Möbius	ASNA	MSMC	Mathematica	Matlab	Maple
1. Построение ММ									
1.1. Ручное графическое	+	+				+			
1.2. Ручное текстовое	+		+				+	+	+
1.3. Генерация			+	+	+				
2. Портирование матрицы A									
2.1. Импорт из текстового редактора	+		+			+	+	+	+
2.2. Экспорт в текстовый редактор	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2.3. Импорт из табличного редактора						+			
2.2. Экспорт в табличный редактор		+				+		+	
3. Метрический анализ ММ									
3.1. Определение жесткости						+	+		+
3.2. Определение связности						+	+	+	+
3.3. Определение разложимости			+			+			
3.4. Определение периодичности			+				+		
4. Наличие методов									
4.1. Для стационарного решения ММ	+	+	+	+		+	+	+	+
4.2. Для переходного решения ММ	+	+	+	+		+	+	+	+
5. Отчеты									
5.1. Встроенная генерация отчетов	+	+	+	+	+	+			
5.2. Портирование результатов в табличные либо текстовые редакторы		+	+			+	+	+	+

Генерация модели подразумевает использование более высокоуровневого формализма, как например SAN, тем самым внедряя необходимость проведения дополнительной проверки высокоуров-

невой модели. Однако необходимо отметить, что выбранное ПС с функцией построения ММ одним из выше описанных способов должно содержать возможность экспортирования матрицы коэффици-

ентов в формат табличного либо текстового редакторов. Наиболее известными представителями группы ПС позволяющих ручное построение ММ (*BuildGR*, *BuildCom*) являются: SHARP, ToolKit Markov (ITEM), MARCA, λPredict (ReliaSoft).

Одними из представителей ПС с возможность генерации ММ (*Gen*) являются такие средства как Möbius, использующие высокоуровневый формализм SAN (stochastic activity networks) для последующей генерации ММ, либо ASNA, формирующая ММ на основе множества логических нотаций, описывающих процесс функционирования системы.

Табл. 1 содержит сравнительный анализ функций рассматриваемых в алгоритме инструментальных средств, которые могут быть использованы для поддержки процесса оценивания готовности ИУС с помощью описанной методики.

Выводы

Предложены метрико-интервальные модели базирующиеся на описании таких характеристик ММ ИУС как жесткость, разреженность, разложимость и фрагментность. Это позволяет, используя анализ взаимовлияния характеристик, проводить выбор техники (метода) решения ММ, а также инструментальные средства с целью уменьшения риска неточных расчетов показателей готовности и безопасности.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на усовершенствование, а также внедрение принципа самоадаптации алгоритма метрического анализа, основываясь на полученных статистических данных по его применению.

Список литературы

1. *Безопасность атомных станций: системы управления и защиты ядерных реакторов [Текст] / М.А. Ястребенецкий, Ю.В. Розен, С.В. Виноградская, Г.Джонсон, В.В. Елисейев, А.А. Сиора, В.В. Скляр, Л.И. Спектор, В.С. Харченко - К.: Основа-Принт, 2011. - 768 с.*

2. *Kharchenko, V. Multi-fragmental availability models of critical infrastructures with variable parameters of system dependability [Text] / V. Kharchenko, O. Odarushchenko, V. Odarushchenko // International Journal Information & Security. - 2011. - 28. - P. 248 - 265.*

3. *Trivedi, K.S., Achieving and assuring high availability [Text] / K.S. Trivedi, G. Ciardo, B. Dasarathy, M. Grottko, A. Rindos, B. Vashaw // Proc. 13th IEEE workshop on dependable parallel, 22nd IEEE International parallel & distributed processing symposium. - 2008.*

4. *Archana, S. Availability models in practice [Text] / S. Archana, R. Srinivasan, K. S. Trivedi // Proc. Int. Workshop on Fault-Tolerant Control and Computing (FTCC-1), Seoul, Korea. - 2000.*

5. *Kharchenko, V. Markov's model and tool-based assessment of safety-critical I&C systems: gaps of the IEC 61508 [Text] / V. Kharchenko, O. Odarushchenko, V. Butenko, P. Popov, V. Sklyar, E. Odarushchenko // Proc. 12th International conference on probabilistic safety assessment and modeling. - pass: http://psam12.org/proceedings/paper/paper_455_1.pdf*

6. *Kharchenko, V. Availability assessment of Computer Systems Described by Stiff Markov Chains: Case Study [Text] / V. Kharchenko, O. Odarushchenko, P. Popov, V. Odarushchenko // Springer. - CCIS(412). - 2013. - P. 112 - 135*

7. *IEC 61508 (6 part), Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. - 2010.*

8. *Bobbio, A.A. Aggregation Technique for Transient Analysis of Stiff Markov Chains [Text] / A.A. Bobbio, K.S. Trivedi // IEEE Trans. on Comp.. - 1986. - C-35. - P. 803-814.*

9. *Арушанян О.Б. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране [Текст] / О.Б. Арушанян, С.Ф. Залеткин - М.: МГУ, 1990. - 336 с.*

10. *Courtois P.J. Decomposability: Queueing and Computer Applications [Text] / P.J. Courtois. - NY.: Academic Press, 1977. - 201 p.*

11. *Barge W.S. Autonus Solution Methods for Large Markov Chains [Text] / W.S. Barge, W.J. Stewart. // Pennsylvania State University, CiteSeerX Archives, 2002. - P. 17.*

Поступила в редколлегию 6.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Л. Ляхов, Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Полтава.

МЕТРИКО-ИНТЕРВАЛЬНІ МОДЕЛІ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МАРКІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

В.С. Харченко, В.О. Бутенко, О.М. Одарущенко

У статті розглядається побудова метрико-інтервальних моделей, а також алгоритм вибору інструментальних засобів для оцінювання готовності інформаційно-керуючих систем з використання марківських процесів. Запропоновані метрико-інтервальні моделі застосовуються для обрання техніки розв'язку марківських моделей надійності інформаційно-керуючих систем з метою зменшення ризику проведення неточних розрахунків показників готовності систем важливих для безпеки.

Ключові слова: марківські моделі, метрики, метрико-інтервальні моделі, жорсткість, фрагментність, розріженість, розкладність, інструментальні засоби.

METRIC-BASED MODELS AND SOFTWARE TOOLS FOR I&C SYSTEMS AVAILABILITY ASSESMENT USING MARKOV CHANS

V.S. Kharchenko, V.O. Butenko, O.M. Odarushchenko

This paper describes the process of metric-based models construction and the algorithm for software tools selection. The presented models and algorithm are applied for I&C systems availability assessment using Markov chains to increase the achieved results accuracy by eliminating the non-effective methods, and automatically checking that the requirements for result accuracy are tracked by selected method.

Keywords: Markov chains, metrics, metric-based models, stiffness, fragmentedness, sparsity, decomposability, software.