

УДК 62-192:519.2

О.В. ИВАНЧЕНКО

Севастопольский национальный технический университет

## ПОЛУМАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

*В статье на основе структурно-ориентированного применения аппарата моделирования полумарковских процессов получены расчетные соотношения для оценки уровня надежности и живучести критических инфраструктур (КИ) с учетом режимов мониторинга их информационно-технического состояния. Полученные результаты подтверждают то, что существует необходимость дальнейшего совершенствования аппарата структурно-ориентированного моделирования процессов функционирования компонентных составляющих и систем обеспечения технической готовности критических инфраструктур.*

**Ключевые слова:** полумарковская модель, критическая инфраструктура, надежность, живучесть.

### Введение

Возможности экономического процветания человечества в значительной степени зависят от перспектив развития критической инфраструктуры (КИ).

Одним из основных требований, предъявляемых к КИ, является обеспечение требуемого уровня их надежности, живучести в случаях возникновения различных видов отказов и других негативных событий. Решение этой проблемы в значительной степени зависит от эффективного использования по назначению системы мониторинга информационно-технического состояния КИ, функционирующей в различных режимах контроля и диагностирования. Важные аспекты данной проблемы с позиций анализа последствий аварий критических инфраструктур, в первую очередь, – в сфере электроэнергетики, освещены в [1, 2].

Архитектурно-ориентированный подход (АОП) к оценке уровня надежности и заданию тестовых последовательностей программного обеспечения (ПО) систем управления КИ по результатам мониторинга их информационно-технического состояния представлен в [3]. Теоретической основой АОП являются опорные модели «роста», используемые для обоснования требуемого уровня надежности ПО на стадии его тестирования [4, 5]. Определенный интерес, с точки зрения анализа возможностей структурного мониторинга сложных технических систем, вызывает материал, изложенный в работах [6, 7].

Оригинальное техническое решение для системы мониторинга компонентов КИ с использованием радиосенсорной сети (WSNs) и результаты имитационного моделирования в среде MobiusXMLParser изложены в [8]. Научной основой для моделирования в [8] является корректно обоснованное применение аппара-

та марковских цепей и структурированное построение объекта моделирования с помощью сетей Петри.

Однако, в указанных работах недостаточно полно освещены особенности функционирования системы мониторинга КИ в различных режимах применения по назначению. А именно, в режимах контроля технического состояния (КТС) и диагностирования. Для решения этой задачи, по мнению автора, целесообразно использовать полумарковские модели, которые адекватно отражают особенности и свойства системы мониторинга КИ.

**Целью статьи** является оценка уровня надежности и живучести критических инфраструктур с учетом режимов мониторинга их информационно-технического состояния на основе структурно-ориентированного применения аппарата моделирования полумарковских процессов.

### Изложение основного материала

**Исходные положения.** В соответствии с [2] для обеспечения эффективного функционирования критических инфраструктур при приоритете их надежности и безопасности должен соблюдаться принцип архитектурной комплементарности. Указанный принцип положен в основу концепции управления КИ по техническому мегасостоянию (МГС) [9]. Согласно данной концепции управление готовностью КИ по МГС осуществляется при непрерывном мониторинге информационно-технического состояния компонентов инфраструктуры. К сожалению, анализ последствий аварий критических энергетических инфраструктур (КЭИ) [1, 2] свидетельствует о серьезных нарушениях этого важного положения, выражающихся в пренебрежи-

тельном отношении к достоверным результатам КТС и игнорировании требований технической диагностики. Одной из основных причин такого отношения является использование упрощенных, чрезмерно формализованных математических моделей мониторинга компонентов КЭИ.

На сегодняшний день одной из наиболее распространенных полумарковских моделей (ПММ) КИ с достоверным КТС является модель [2], описываемая графом состояний, изображенном на рис. 1. Множество состояний  $E_i$ , где  $i = \overline{0,2}$ , включает следующие состояния:  $E_0$  – КИ работоспособна (РС);  $E_1$  – КИ в состоянии КТС;  $E_2$  – КИ в неработоспособном состоянии (НРС). Предполагается, что с установленной периодичностью, соответствующей неслучайной продолжительности эксплуатации инфраструктуры  $T$ , в течение детерминированного интервала времени  $\tau_{\text{КТС}}$  проводится КТС. Начальное состояние КИ в момент  $t=0$  описывается значениями вероятностей  $P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = 0$ .

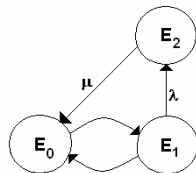


Рис. 1. Граф состояний КИ с достоверным КТС

Результаты моделирования для данной ПММ в виде графика зависимости нестационарного коэффициента готовности (НКГ)  $P_0(\lambda, T)$  от интенсивности отказов  $\lambda$  и  $T$  для случая экспоненциального закона распределения внезапных отказов и времени восстановления, распределенного по закону Эрланга с параметром  $\mu$ , представлены на рис. 2.

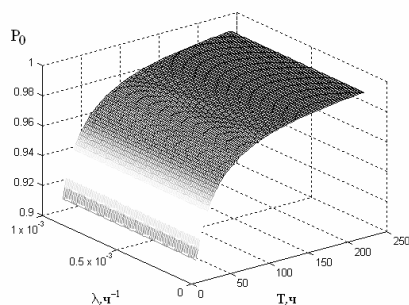


Рис. 2. Зависимость  $P_0(\lambda, T)$  для модели КИ с достоверным КТС

Полученные результаты (рис. 2) являются слишком оптимистичными, поскольку не учитывают негативные ситуации, связанные с наличием различного рода информационных уязвимостей [2,10] и скрытых

отказов. Такие отказы для КЭИ порождают каскадный эффект и приводят к тяжелейшим последствиям. Исходя из этого, попытаемся построить модели мониторинга КЭИ с учетом результатов КТС и технической диагностики компонентов энергоинфраструктуры.

**Модель мониторинга информационно-технического состояния компонентов КИ.** Полумарковский процесс задан графом состояний (рис. 3), т.е. состояниями  $i = \overline{0,7}$  из множества  $E$  ( $i \in E$ ), и возможными переходами  $[ij]$ . Начальные состояния соответствуют  $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0$ , где  $i = \overline{1,6}$ . Согласно приведенного графа (рис. 3) будем полагать, что в процессе функционирования на протяжении интервала эксплуатации  $T$  один из компонентов КИ (сложная техническая система (СТС) или изделие критического применения) может находиться в следующих состояниях:  $E_0$  – СТС РС;  $E_1$  – СТС в состоянии периодического КТС, в ходе которого возникают внезапные и ложные отказы;  $E_2$  – СТС в состоянии технического диагностирования после возникновения отказов в ходе КТС (поиск и локализация места отказа);  $E_3$  – СТС в состоянии восстановления после возникновения внезапных отказов в ходе КТС и после выполнения мероприятий технического диагностирования, а также в состоянии восстановления после обнаружения скрытого отказа и цикла КТС-техническое диагностирование из состояния скрытого отказа;  $E_4$  – СТС НРС, но считается РС (состояние скрытого отказа);  $E_5$  – состояние периодического КТС СТС, находившейся в состоянии скрытого отказа.

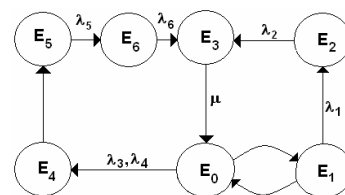


Рис. 3. Граф состояний модели мониторинга информационно-технического состояния компонентов КИ

В соответствии с множеством возможных состояний  $E$  ( $i \in E$ ) получим матрицу  $Q = |Q_{ij}(t)|$  независимых функций распределения времени пребывания СТС в  $i$ -ом состоянии перед переходом в  $j$ -е состояние, которая должна включать девять ненулевых составляющих. Параметры распределений  $Q_{ij}(t)$  задаются в предположении: а) переход из состояния  $E_0$  в  $E_1$  происходит за фиксированное неслучайное время  $\tau_{\text{КТС}}$ ; б) переход из состояния  $E_1$  в  $E_2$  происходит за случайное время, распределенное по закону

Эрланга 2-го порядка с параметром  $\lambda_1$ ; в) переход из состояния  $E_2$  в  $E_3$  – за случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda_2$ ; г) переход из состояния  $E_3$  в  $E_0$  – за случайное время, распределенное по закону Эрланга 4-го порядка с параметром  $\mu$ ; д) переход из  $E_0$  в  $E_4$  – по гиперэкспоненциальному закону [3] с параметрами  $\lambda_3, \lambda_4$ ; е) переход из состояния  $E_5$  в  $E_6$  – за случайное время, распределенное по закону Эрланга 3-го порядка с параметром  $\lambda_5$ ; ж) переход из состояния  $E_6$  в  $E_3$  – за случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda_6$ . Сложнее найти величину  $Q_{45}(t)$ , определяющую переход из состояния  $E_4$  скрытого отказа в состояние  $E_5$  (КТС), т.к. скрытый отказ возникает с некоторой вероятностью в случайный момент времени, а заканчивается всегда в неслучайный момент начала проверок [11], определенных регламентом проведения КТС.

Выполнив нетривиальные расчеты, в соответствии с методикой, изложенной в [2,11], получим соотношения для расчета НКГ  $P_0(t)$  и соответствующих вероятностей  $P_i(t)$ , где  $i = \overline{1,6}$ , в виде

$$P_0 = \frac{\alpha_1(1 - P_1) - \alpha_2(1 - P_2)}{A}, \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{2\beta_1(\alpha_1 P_1 - \alpha_2 P_2)}{A}, \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\beta_2(1 - P_3 - \gamma P_3)(\alpha_1 P_1 - \alpha_2 P_2)}{A}, \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{\tau_B[1 - P_3(\alpha_2 P_2 - \alpha_1 P_1)(1 + \gamma)]}{A}, \quad (4)$$

$$P_4 = \frac{[1 - \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2][T - G]}{A}, \quad (5)$$

$$P_5 = \frac{\beta_3(1 - \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2)}{A}, \quad (6)$$

$$P_6 = \frac{\beta_4(1 - \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2)}{A}, \quad (7)$$

где

$$A = A1 + A2 + A3$$

$$A1 = \alpha_1(1 - P_1) - \alpha_2(1 - P_2) + B(\alpha_1 P_1 - \alpha_2 P_2),$$

$$A2 = \tau_B[1 - P_3(1 + \gamma)(\alpha_1 P_1 - \alpha_2 P_2)],$$

$$A3 = (1 - \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2)[(T - G) + \beta_1 + \beta_3],$$

$$B = 2\beta_1 + \beta_2[1 - (1 + \gamma)P_3],$$

$$G = \frac{\alpha_1 \lambda_4 (1 - P_1) + \xi(\alpha_2 P_1 - \alpha_1 P_2) - \alpha_2 \lambda_3 (1 + P_2)}{\xi(1 - \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2)},$$

$$P_1 = e^{-\lambda_3 T}, \quad P_2 = e^{-\lambda_4 T}, \quad P_3 = e^{-\lambda_1 \tau_{\text{КТС}}},$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3}, \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_3}{\lambda_4 - \lambda_3},$$

$$\beta_1 = \frac{1}{\lambda_1}, \quad \beta_2 = \frac{1}{\lambda_2}, \quad \beta_3 = \frac{1 + 2\lambda_5}{\lambda_5^2}, \quad \beta_4 = \frac{1}{\lambda_6},$$

$$\gamma = \lambda_1 \tau_{\text{КТС}}, \quad \xi = \lambda_3 \lambda_4,$$

$$\tau_B = \frac{1 + \mu + 2\mu^2}{\mu^3}.$$

На рис. 4 представлены графики зависимости  $P_i(T_0, T_B)$ , где  $i = 0,2,3,4$ , полученные для следующих исходных данных:  $\lambda_1 = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2 = 0,01 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_3 = 0,0002 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_5 = 0,005 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_6 = 0,001 \text{ ч}^{-1}$ .

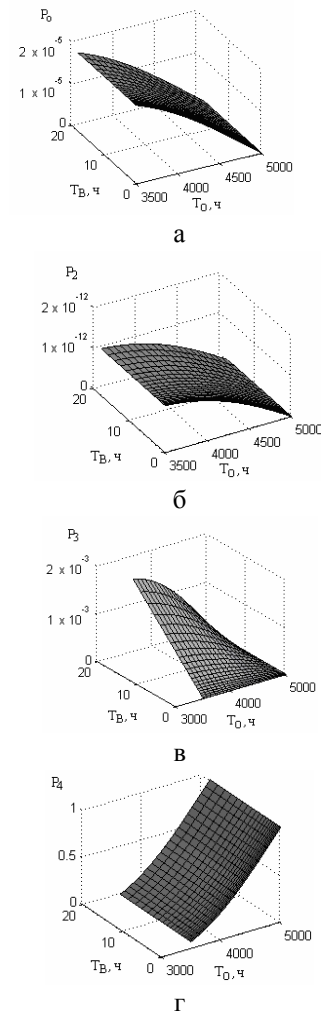


Рис. 4. Зависимости  $P_i(T_0, T_B)$  для  $\tau_{\text{КТС}} = 3$  мин.

**Модель мониторинга информационно-технического состояния КЭИ.** Полумарковский процесс мониторинга КЭИ, включающей в свой состав подстанцию (ПТС) и две параллельно подключенные к ПТС линии электропередачи (ЛЭП), задан графом состояний (рис. 5), т.е. состояниями  $i = \overline{0,8}$  из множества  $E$  ( $i \in E$ ), и возможными переходами  $[ij]$ . Началь-

ные состояния соответствуют  $P_0(0)=1, P_i(0)=0$ , где  $i = \overline{1,8}$ .

Представленный граф (рис. 5) описывает функционирование системы мониторинга в режиме автономного КТС каждого компонента инфраструктуры (состояния  $E_1, E_3, E_5$ ) для случая возникновения скрытого отказа КЭИ, например, каскадные отключения (состояние  $E_7$ ).

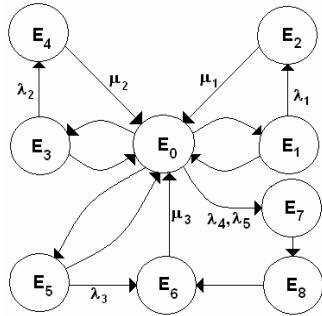


Рис. 5. Граф состояний модели мониторинга информационно-технического состояния КЭИ

Состояние  $E_6$  соответствует восстановление РС КЭИ из состояния скрытого отказа после очередного КТС компонентов инфраструктуры (состояние  $E_8$ ). Параметры распределений  $Q_{ij}(t)$  задаются в предположении: а) переходы из состояний  $E_1$  в  $E_2, E_3$  в  $E_4, E_5$  в  $E_6$  происходят за случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с параметрами, соответственно,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ; б) переход из  $E_0$  в  $E_7$  – по гиперэкспоненциальному закону [3] с параметрами  $\lambda_4, \lambda_5$ ; в) переходы из состояний  $E_2, E_4, E_6$  в  $E_0$  – по закону Эрланга, соответственно, 2-го порядка с параметрами  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , 4-го порядка с параметром  $\mu_3$ .

Расчетные соотношения для определения значений соответствующих вероятностей  $P_i(t)$ , где  $i = \overline{0,8}$ , записываются в следующей форме:

$$P_0 = \frac{\alpha_1(1 - P_{ки}^{(1)})}{A}, \tag{8}$$

$$P_1 = \frac{\beta_1 P_{ки} (1 - P_1)}{A}, \tag{9}$$

$$P_2 = \frac{\tau_{в1} P_{ки} (1 - P_1)}{A}, \tag{10}$$

$$P_3 = \frac{\beta_2 P_{ки} (1 - P_2)}{A}, \tag{11}$$

$$P_4 = \frac{\tau_{в2} P_{ки} (1 - P_2)}{A}, \tag{12}$$

$$P_5 = \frac{\beta_3 P_{ки} (1 - P_3)}{A}, \tag{13}$$

$$P_6 = \frac{\tau_{в3} (1 - 2P_{ки} - P_{ки} P_3)}{A}, \tag{14}$$

$$P_7 = \frac{(1 - 3P_{ки})(T - G)}{A}, \tag{15}$$

$$P_8 = \frac{\tau_{ктс3} (1 - 3P_{ки})}{A}, \tag{16}$$

где

$$A = A1 + A2 + A3,$$

$$A1 = \alpha_1(1 - P_{ки}^{(1)}) - \alpha_2(1 - P_{ки}^{(2)}),$$

$$A2 = P_{ки} [(1 - P_1)(\beta_1 + \tau_{в1}) + B],$$

$$B = (1 - P_2)(\beta_2 + \tau_{в2}) + (1 - P_3)(\beta_3 + \tau_{в3}),$$

$$A3 = (1 - 3\alpha_1 P_{ки}^{(1)} + 3\alpha_2 P_{ки}^{(2)}) [T + \tau_{ктс3} + \tau_{в3} - G],$$

$$G = \frac{\alpha_1 \lambda_5 (1 - P_{ки}^{(1)}) + 3\xi(\alpha_2 P_{ки}^{(2)} - \alpha_1 P_{ки}^{(1)}) - C}{\xi(1 - 3\alpha_1 P_{ки}^{(1)} + 3\alpha_2 P_{ки}^{(2)})},$$

$$C = \alpha_2 \lambda_4 (1 + P_{ки}^{(2)}),$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_5}{\lambda_5 - \lambda_4}, \alpha_2 = \frac{\lambda_4}{\lambda_5 - \lambda_4}, \beta_1 = \frac{1}{\lambda_1}, \beta_2 = \frac{1}{\lambda_2},$$

$$\xi = \lambda_4 \lambda_5, T_0 = \beta_3 = \frac{1}{\lambda_3}, \tau_{в1} = \frac{2}{\mu_1}, \tau_{в2} = \frac{2}{\mu_2},$$

$$T_в = \tau_{в3} = \frac{1 + \mu_3 + \mu_3^2}{\mu_3^3}, P_{ки} = \alpha_1 P_{ки}^{(1)} - \alpha_2 P_{ки}^{(2)},$$

$$P_{ки}^{(1)} = e^{-\lambda_4 T}, P_{ки}^{(2)} = e^{-\lambda_5 T},$$

$$P_1 = e^{-\lambda_1 \tau_{ктс1}}, P_2 = e^{-\lambda_2 \tau_{ктс2}}, P_3 = e^{-\lambda_3 \tau_{ктс3}}.$$

На рис. 6 представлены графики зависимости  $P_i(T_0, T_в)$ , где  $i = 0,6,7,8$ , полученные для следующих исходных данных:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0,001 \text{ ч}^{-1},$$

$$\lambda_4 = 0,016 \text{ ч}^{-1},$$

$$\lambda_5 = 0,017 \text{ ч}^{-1},$$

$$\mu_1 = \mu_2 = 0,5 \text{ ч}^{-1}.$$

Результаты, полученные с использованием соотношений (1),..., (16), свидетельствуют о низкой эффективности функционирования системы мониторинга КИ в условиях протекания скрытых отказов компонентных составляющих инфраструктуры.

### Заключение

Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего совершенствования аппарата структурно-ориентированного моделирования процессов функционирования компонентных составляющих

и систем обеспечения технической готовности критических инфраструктур.

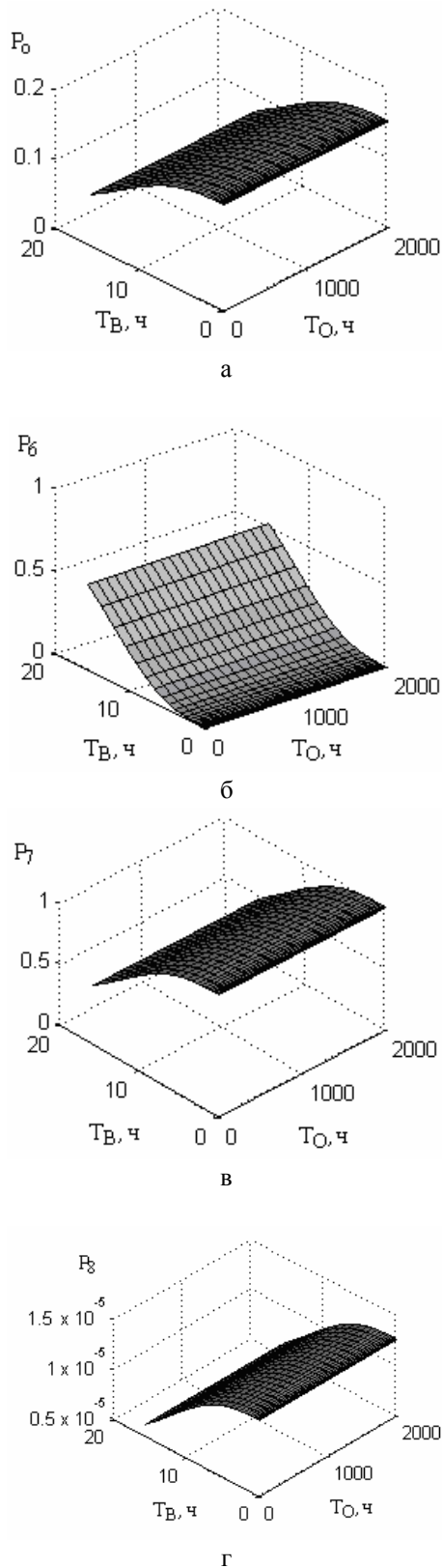


Рис. 6. Зависимости  $P_i(T_O, T_B)$  для  $\tau_{кТС} = 3$  мин.

### Литература

1. U.S.-Canada Power System Outage Task Force: Final Report on the August, 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations. [Text]. - April 2004. - 228 p.

2. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения. [Текст] / под ред. В.С. Харченко. - Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2011. - 641с.

3. Pietrantuono, R. Software Reliability and Testing Time Allocation: An Architecture-Based Approach. [Text] / R. Pietrantuono, S. Russo, Kishor S. Trivedi // IEEE Transactions on Software Engineering. - 2010. - Vol. 36, no. 3. - P. 323-337.

4. Lyu, Michael R. Optimal Allocation of Test Resources for Software Reliability Growth Modeling in Software Development [Text] / Michael R. Lyu, Sampath Rangarajan, Aad P.A. van Moorsel // IEEE Trans. on Reliability. - 2002. - Vol. 51, no. 2. - P. 54 - 59.

5. Hou, R.-H. Efficient allocation of testing resources for software module testing based on the hypergeometric distribution software reliability growth model [Text] / R.-H. Hou, S.-Y. Kuo, Y.-P. Chang // Proc. of 7th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE '96), p. 289-298, Oct./Nov. 1996.

6. A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring [Text] / N. Xu, S. Rangwala, K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan // Estrin Proc. of the 2th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '02), November 2004.

7. Ceriotti, M. Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The torre aquila deployment [Text] / M. Ceriotti, L. Mottola, G. P. e. a. Picco // in IPSN '09: Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. - P. 277 - 288.

8. Cinque, M. Automated Generation of Performance and Dependability Models for the Assessment of Wireless Sensor Networks [Text] / M. Cinque, D. Cotroneo, C. Di Martino // IEEE Transactions on Computers, 05 May 2011 DOI: 10.1109/TC.2011.96 IEEE Computer Society Press. - P. 48 -52.

9. Management of Critical Infrsatructures Based on Technical Megastate [Text] / A.V. Skatkov, O.V. Ivanchenko, V.S. Kharchenko, V.S. Lovyaghin // Critical Infrastructure Safety and Security (CrISS-DESSERT'11). - 2011. - Vol. 1, - P. 168 -180.

10. Johnson, C.W. Understanding Failures in International Safety-Critical Infrastructures: A Comparison of European and North American Power Failures. [Electronic resource]/ C.W. Johnson. - Access mode: <http://www.dcs.gla.ac.uk/~johnson>. - 20.12.2011 y.

11. Волков, Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов [Текст] / Л.И. Волков. - М.: Высшая школа, 1981. - 368 с.

Поступила в редакцію 2.03.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Твердохлебов, Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия.

### НАПІВМАРКІВСЬКІ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КРИТИЧНИХ ІНФРАСТРУКТУР

*О.В. Іванченко*

На основі структурноорієнтованого застосування апарата моделювання напівмарківських процесів отримано розрахункові співвідношення для оцінки рівня надійності та живучості критичних інфраструктур (КІ) з урахуванням режимів моніторингу їхнього інформаційно-технічного стану. Отримані результати підтверджують необхідність подальшого вдосконалення апарату структурноорієнтованого моделювання процесів функціонування компонентних складових і систем забезпечення технічної готовності критичних інфраструктур.

**Ключові слова:** напівмарківська модель, критична інфраструктура, надійність, живучість.

### SEMI-MARKOV MODELS FOR INFORMATION AND TECHNICAL STATE MONITORING OF CRITICAL INFRASTRUCTURES

*O.V. Ivanchenko*

On the basis of the structure-oriented application of the apparatus for semi-Markov processes modeling the calculated dependences are obtained to assess the reliability and safety level of critical infrastructure (CI), taking into account the mode of their information and technical state monitoring. The results confirm the need for further improvement in the device structure-oriented process modeling component of functioning components and systems to ensure operational readiness of critical infrastructures.

**Key words:** Semi-Markov model, critical infrastructure, reliability, survivability.

**Іванченко Олег Васильевич** – канд. техн. наук, доц. каф. кибернетики и вычислительной техники, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина, e-mail: vmsu12@gmail.com.