

УДК 62-192:004.942

О.В. ИВАНЧЕНКО¹, В.С. ХАРЧЕНКО², Д.Ю. БИРЮКОВ²¹Севастопольский национальный технический университет, Украина²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Представлена математическая модель аварии критической инфраструктуры (КИ), учитывающая совместное воздействие внешних и внутренних факторов. Оценка уровня надежности инфраструктуры выполнена в условиях протекания каскадных отказов компонентных составляющих КИ. По результатам математического моделирования получены количественные оценки показателей функциональной готовности и надежности КИ для заданного сценария развития аварии критической энергетической инфраструктуры. В качестве возможного сценария рассматривается авария Северо-Американской энергетической инфраструктуры, которая произошла в августе 2003 года. Фазовое пространство полученной полумарковской модели помимо классических состояний отказа, восстановления, контроля технического состояния включает состояния нарушения, информационной и функциональной уязвимости.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, каскадные отказы, сценарий развития аварии, полумарковская модель.

Введение

Одной из характерных особенностей последнего десятилетия является увеличение аварий критических инфраструктур (КИ) вследствие стихийных бедствий и катастроф. Непосредственно об этом свидетельствуют последствия аварий на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2010), Саяно-Шушенской ГЭС (Россия, 2009), объединенной энергетической системы США, Канады, энергетических систем отдельных государств Европейского Союза (в августе, сентябре 2003 г.) и т.д. Несмотря на принимаемые меры, по-прежнему актуальной является проблема обеспечения эффективного применения по назначению КИ при приоритете их надежности и функциональной безопасности. Об этом свидетельствует сравнительный анализ аварий критических энергетических инфраструктур, выполненный в [1].

Сложность обеспечения требуемого уровня надежности, функциональной безопасности КИ обусловлена необходимостью одновременного учета влияния множества факторов, воздействующих на различные компонентные составляющие инфраструктурных образований, которые приводят к серьезным нарушениям их готовности при использовании по назначению. Негативный эффект усиливается возникающим дисбалансом в управлении КИ и последующими каскадными отказами, протекающими в форме неконтролируемых отключений большинства элементов инфраструктуры. Вследствие чего нарушаются сложные комплементарные

связи между различными инфраструктурными образованиями, которые могут оказывать разрушительное воздействие на окружающую среду, на экономику государства и создают серьезную угрозу жизни, здоровью людей, – потребителей продукции, услуг, производимых КИ [2]. Поэтому возможность моделирования процессов взаимодействия, взаимного влияния между компонентными составляющими КИ в период протекания аварий и инцидентов вызывает особый интерес.

Для моделирования сложных связей между компонентными составляющими внутри КИ и при их взаимодействии с другими инфраструктурными образованиями наиболее часто используют аппарат моделирования полумарковских процессов [3, 4]. Один из предлагаемых подходов основан на учете множества состояний критических инфраструктур при деградации их уровня надежности и безопасности [5]. С точки зрения более точного анализа безопасности и эффективности КИ предпочтение отдается моделям, учитывающим продолжительность и режимы функционирования их компонентных составляющих [6, 7].

Однако, наряду с достоинствами указанные стохастические подходы позволяют выполнить оценку уровня надежности КИ для довольно оптимистичных сценариев развития тех или иных негативных событий. Например, единичные отказы технологического оборудования моделируются в условиях отсутствия сбоев ИТ-составляющей КИ; сбой программного обеспечения систем управления

моделируются как независимые события, которые не влияют на функциональную готовность других компонентных составляющих инфраструктуры и т.д. В действительности выполненный расширенный анализ для критических энергетических инфраструктур (КЭИ) [8,9] свидетельствует о необходимости построения моделей протекания аварий и инцидентов КЭИ в условиях многофакторного негативного воздействия.

В данной работе предложен стохастический подход к построению математической модели протекания аварии КЭИ, учитывающий причинно-следственные связи между компонентами рассматриваемого инфраструктурного образования. Предполагается, что авария протекает в форме каскадных отказов, вызванных совместным влиянием нескольких негативных факторов. Применение предлагае-

мого подхода значительно расширяет возможности реализации компаративистической процедуры анализа различных сценариев протекания аварии КИ, позволяет выполнить количественную оценку функциональной готовности инфраструктурного образования в различных условиях применения по назначению.

Постановка задачи исследования

Рассмотрим критическую энергетическую инфраструктуру, включающую в свой состав четыре основные группы компонентных составляющих, а именно: генерацию, передачу, распределение, потребление (рис. 1). Будем полагать, что компонентные составляющие КЭИ представляют собой критические системы (КС).

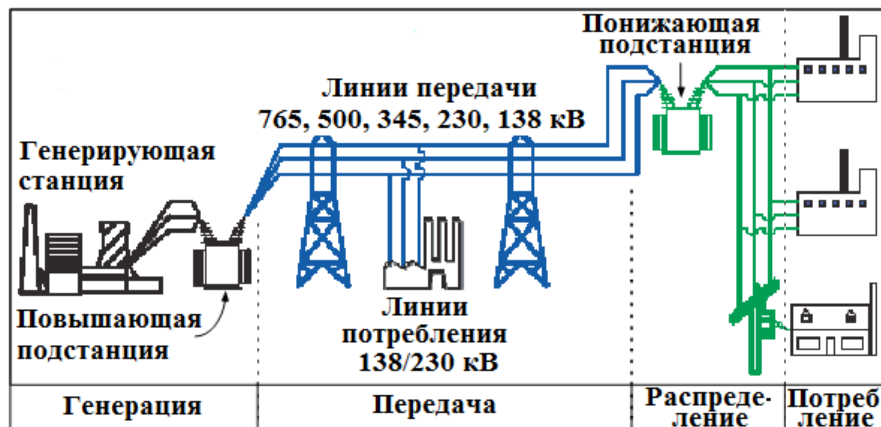


Рис. 1. Структура КЭИ

Для обеспечения функциональной готовности и надежности компонентов КЭИ используются системы оценки состояния и стохастического анализа данных, которые информационно обеспечивают работу основного сервера энергетической инфраструктуры. Известно [10], что отказ одной из указанных систем возникает вследствие известных и вновь возникающих уязвимостей ИТ-составляющих инфраструктуры, которые приводят к серьезным нарушениям в работе технологического оборудования. В частности, если информационная сеть, используемая для предварительного контроля и оценки технического состояния инфраструктурного образования, охватывает, предположим, только 70% компонентных составляющих, то можно утверждать, что рассматриваемая КИ функционирует в условиях существования информационной уязвимости. Помимо информационных уязвимостей могут существовать функциональные уязвимости, связанные с отсутствием соответствующих систем контроля технического состояния КС. Поэтому при построении полумарковской модели протекания ава-

рии КЭИ будем исходить из того, что ее фазовое пространство определяется множеством возможных состояний КС, входящих в состав инфраструктурного образования. В свою очередь, на основе теоретико-множественной модели можно построить упрощенную логическую схему протекания аварии КИ.

Возможные состояния КС и КИ зададим с помощью следующих нотаций: M_S^{CrI} – множество основных технических состояний, в которых КИ выполняет заданные функции; M_S^{CrS} – подмножество технических состояний КС, влияющих на выполнение КИ заданных функций, $M_S^{CrS} \subset M_S^{CrI}$; M_F^{CrI} – множество состояний отказов, неисправностей КИ; M_R^{CrI} – множество состояний, в которых реализуется процесс восстановления КИ; M_F^{CrS} – множество состояний уязвимостей, нарушений и отказов КС; M_R^{CrS} – множество состояний, в которых реализуется процесс восстановления КС, влияющих на выполнение КИ заданных функций. Отображение

$\Omega: M_F^{CrI} \Rightarrow M_R^{CrI}$ задаєт отношение между множествами M_F^{CrI} и M_R^{CrI} , которое отождествляется с некоторым подмножеством N декартова произведения $M_F^{CrI} \times M_R^{CrI}$, называемым *графиком отображения* Ω и определяемым как [11]:

$$N = \{(x, y) | x \in M_F^{CrI} \wedge y \in M_R^{CrI} \wedge \Omega(x) = y\}. \quad (1)$$

Аналогично с отображением Ω , в соответствии с (1) задается отображение $\Omega_2: M_F^{CrS} \Rightarrow M_R^{CrS}$, т.е.

$$N = \{(w, z) | w \in M_F^{CrS} \wedge z \in M_R^{CrS} \wedge \Omega_2(w) = z\}. \quad (2)$$

Указанные нотации следует рассматривать как теоретико-множественную модель КЭИ, которую можно использовать для формализованного представления о состояниях инфраструктуры. Однако, использовать такую модель для определения количественных значений показателей функциональной готовности КЭИ сложно. Для решения этой задачи требуется учесть начальные условия, режимы эксплуатации и направления переходов инфраструктуры и ее компонентных составляющих из одного состояния в другое.

В общем виде процесс функционирования КЭИ, включая аварии и инциденты, можно описать с помощью следующей системы ограничений:

$$\mathfrak{S} = \begin{cases} \theta \subset \Theta, \vartheta_k = \emptyset, k \notin i, i = \overline{1, n}, \\ \varphi \subset \Theta, \vartheta_l \neq \emptyset, l \in j, j = \overline{1, m}, \\ \varepsilon \subset \Theta, \vartheta_s = \emptyset, s \notin r, r = \overline{1, u}, \\ \psi \subset \Theta, \vartheta_z \neq \emptyset, z \in h, h = \overline{1, v}, \\ K_{r, i, s}(t) \geq K_{r, tr}, \\ K_{r, j, z}(t) < K_{r, tr}, \\ C_{min, tr} \leq C_{tr} \leq C_{max, tr}, \\ C_{tr} > C_{max, tr}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Theta = \theta \cup \varphi \cup \varepsilon \cup \psi$ – множество значений показателя цикломатической сложности (ЦС) для известной совокупности графов состояний; $\theta = \{\vartheta_i\}_{i=1}^n$ – множество значений показателя ЦС для графов, не содержащих поглощающие состояния; $\varphi = \{\vartheta_j\}_{j=1}^m$ – множество значений показателя ЦС для графов, содержащих поглощающие состояния; $\varepsilon = \{\vartheta_r\}_{r=1}^u$ – множество значений показателя ЦС для графов, не содержащих состояния уязвимости и нарушения работоспособности (РС); $\psi = \{\vartheta_h\}_{h=1}^v$ – множество значений показателя ЦС для графов, содержащих состояния уязвимости и нарушения РС; ϑ_k, ϑ_l – значения показателя ЦС для графов, со-

держащих поглощающие состояния; ϑ_s, ϑ_z – значения показателя ЦС для графов, содержащих состояния уязвимости и нарушения РС; $K_{r, tr}$ – предельно допустимое значение коэффициента готовности (КГ); C_{tr} – предельные затраты на поддержание требуемого уровня надежности и функциональной готовности КЭИ.

В системе ограничений (3) показатель ЦС определяется согласно соотношения [12]

$$\vartheta = E - N + 2, \quad (4)$$

где E – количество ребер графа;

N – количество состояний графа.

Дальнейшие рассуждения будут базироваться на представлении процесса изменения технических состояний КС и КЭИ как полумарковского. Соответственно, требуется построить опорную полумарковскую модель (ПММ), на основе применения которой необходимо выполнить расчеты показателей функциональной готовности и надежности КЭИ в условиях протекания аварии, сопровождающейся каскадными отказами компонентных составляющих инфраструктуры.

Результаты исследования

Построение модели начнем с рассмотрения сценария аварии. Будем полагать, что авария развивается по сценарию, аналогичному Северо-Американскому Blackout (август 2003 г., США) [8]. Это значит, что в разрабатываемой модели влияние внутренних и внешних факторов негативного воздействия является причиной возникновения каскадных отказов. Тогда, без нарушения последовательности событий упрощенная логическая схема протекания аварии с учетом состояний КЭИ может быть представлена в виде, изображенном на рис. 2.

Согласно приведенной логической схеме (рис. 2) первопричиной аварии является совместное воздействие совокупности внутренних и внешних факторов. К группе внешних факторов можно отнести воздействия внешней среды (молнии, жаркая погода, повышенная активность солнца и т.д.). Ошибки обслуживающего персонала, недофинансирование мероприятий технического обслуживания и ремонта, недостоверный контроль информационно-технического состояния (КТС) компонентов КЭИ могут быть отнесены к группе внутренних факторов. Исходя из этого, в соответствии с постановкой задачи зададим полумарковский процесс с помощью графа состояний (рис. 3), на котором указаны состояния $i = \overline{0, 15}$ из множества E ($i \in E$) с возможными переходами $[ij]$.

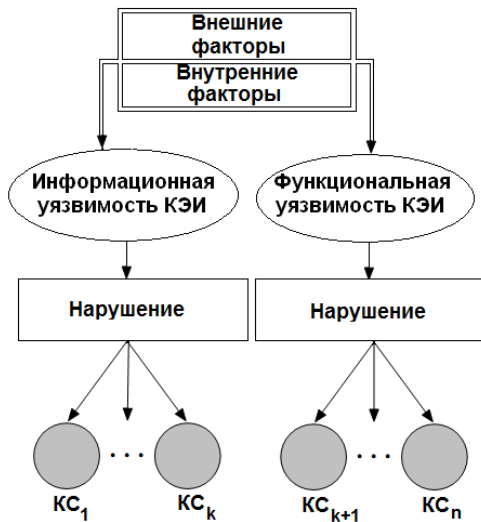


Рис. 2. Упрощенная логическая схема протекания аварии КЭИ

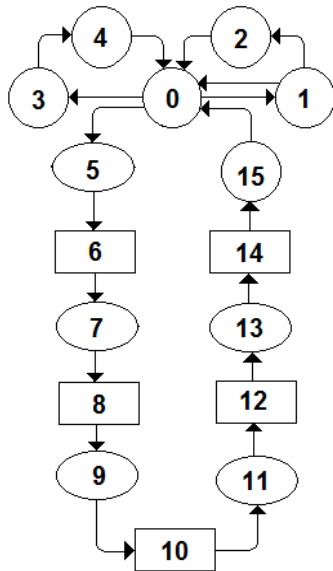


Рис. 3. Граф состояний полумарковской модели

Начальные состояния соответствуют $P_0(0)=1$, $P_j(0)=0$, где $j=\overline{1,15}$. Согласно изображенного на рис. 3 графа состояний будем полагать, что в процессе функционирования на протяжении интервала эксплуатации T критическая энергетическая инфраструктура и ее компонентные составляющие могут находиться в следующих состояниях:

E_0 – КЭИ РС и функционально готова к решению задач применения по назначению;

E_1 – компоненты КЭИ (КС) в состоянии периодического КТС, в ходе которого возникают внезапные и ложные отказы;

E_2 – КС в состоянии текущего ремонта по результатам КТС;

E_3 – КС в состоянии скрытого отказа (несвоевременно обнаруженного внезапного отказа) на интервале между двумя ближайшими КТС;

E_4 – КС в состоянии текущего ремонта после несвоевременного обнаружения внезапного отказа в начальный момент проведения КТС, т.е. $\tau_{КТС} \approx 0$;

E_{15} – КЭИ в состоянии долгосрочного ремонта после каскадных отказов, наблюдавшихся в ходе Blackout (буквально означает «погружение во тьму»).

Состояния E_5, \dots, E_{14} представляют чередующиеся во времени состояния уязвимости и нарушений КС из состава КЭИ, которые фактически соответствуют каскадным отказам компонентных составляющих инфраструктурного образования, наблюдавшихся в период с 12:15 по 16:08 13 августа 2003 г. в ходе Северо-Американского Blackout. В частности, на основе анализа, выполненного в [1, 2, 8, 9], были рассмотрены следующие состояния:

1) E_5, E_6 – состояния информационной уязвимости и нарушения КС КЭИ, соответственно, наблюдавшиеся в ходе 1-го этапа Blackout (12:15-14:14);

2) E_7, E_8, E_9, E_{10} – состояния информационной уязвимости, нарушения и функциональной уязвимости, нарушения КС КЭИ, соответственно, наблюдавшиеся в ходе 2-го этапа Blackout (14:14-14:59);

3) E_{11}, E_{12} – состояния функциональной уязвимости и нарушения КС КЭИ, соответственно, наблюдавшиеся в ходе 3-го этапа Blackout (15:05-14:14);

4) E_{13}, E_{14} – состояния информационной уязвимости и нарушения КС КЭИ, соответственно, наблюдавшиеся в ходе 4-го этапа Blackout (15:39-16:08).

Выполнив нетривиальные расчеты, в соответствии с методикой, изложенной в [1, 2, 13], получим соотношения для расчета стационарного КГ, значение которого определяется как $K_{\Gamma} = P_0(t) + P_1(t)$, и соответствующих вероятностей $P_i(t)$, где $i = \overline{2,15}$, в виде

$$P_0 = \frac{\bar{t}_0}{U}, P_1 = \frac{P_{01}\bar{t}_1}{U}, P_2 = \frac{P_{01}P_{12}\bar{t}_2}{U}, P_3 = \frac{P_{03}\bar{t}_3}{U}, \quad (5)$$

$$P_4 = \frac{P_{03}\bar{t}_4}{U}, P_5 = \frac{P_{05}\bar{t}_5}{U}, P_6 = \frac{P_{05}\bar{t}_6}{U}, P_7 = \frac{P_{05}\bar{t}_7}{U}, \quad (6)$$

$$P_8 = \frac{P_{05}\bar{t}_8}{U}, P_9 = \frac{P_{05}\bar{t}_9}{U}, P_{10} = \frac{P_{05}\bar{t}_{10}}{U}, \quad (7)$$

$$P_{11} = \frac{P_{05}\bar{t}_{11}}{U}, P_{12} = \frac{P_{05}\bar{t}_{12}}{U}, P_{13} = \frac{P_{05}\bar{t}_{13}}{U}, \quad (8)$$

$$P_{14} = \frac{P_{05}\bar{t}_{14}}{U}, P_{15} = \frac{P_{05}\bar{t}_{15}}{U}, \quad (9)$$

$$U = \bar{t}_0 + p_{01}[\bar{t}_1 + p_{12}\bar{t}_2] + p_{03}[\bar{t}_3 + \bar{t}_4] + p_{05} \sum_{j=5}^{15} \bar{t}_j, \quad (10)$$

где $p_{01} = e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)\Gamma}$, $p_{12} = 1 - e^{-\lambda_1 \tau_{КТС}}$,

$$p_{03} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_4} (1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)\Gamma}),$$

$$p_{05} = \frac{\lambda_4}{\lambda_4 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)\Gamma}),$$

$$\bar{t}_0 = \frac{1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)\Gamma}}{\lambda_2 + \lambda_4}, \quad \bar{t}_1 = \frac{1 - e^{-\lambda_1 \tau_{КТС}}}{\lambda_1},$$

$$\bar{t}_2 = \frac{2}{\mu_1} = \tau_{B_1}, \quad \bar{t}_3 = \frac{1}{\lambda_3}, \quad \bar{t}_4 = \frac{4}{\mu_2} = \tau_{B_2},$$

$$\bar{t}_5 = \theta_1^{v_1} \Gamma (1 + v_1), \quad \bar{t}_6 = \frac{1}{\lambda_5}, \quad \bar{t}_7 = \theta_2^{v_2} \Gamma (1 + v_2),$$

$$\bar{t}_8 = \frac{1}{\lambda_6}, \quad \bar{t}_9 = \theta_3^{v_3} \Gamma (1 + v_3), \quad \bar{t}_{10} = \frac{1}{\lambda_7},$$

$$\bar{t}_{11} = \theta_4^{v_4} \Gamma (1 + v_4), \quad \bar{t}_{12} = \frac{1}{\lambda_8},$$

$$\bar{t}_{13} = \theta_5^{v_5} \Gamma (1 + v_5), \quad \bar{t}_{14} = \frac{1}{\lambda_9}, \quad \bar{t}_{15} = \frac{5}{\mu_3} = \tau_{B_3}.$$

На рис. 4 представлены графики зависимости $P_i(\lambda_1, \mu_1)$, где $i = 0, 6, 7, 8$, полученные для следующих исходных данных:

$T = 20$ ч, $\tau_{B_2} = 1$ ч, $\tau_{B_3} = 24$ ч.

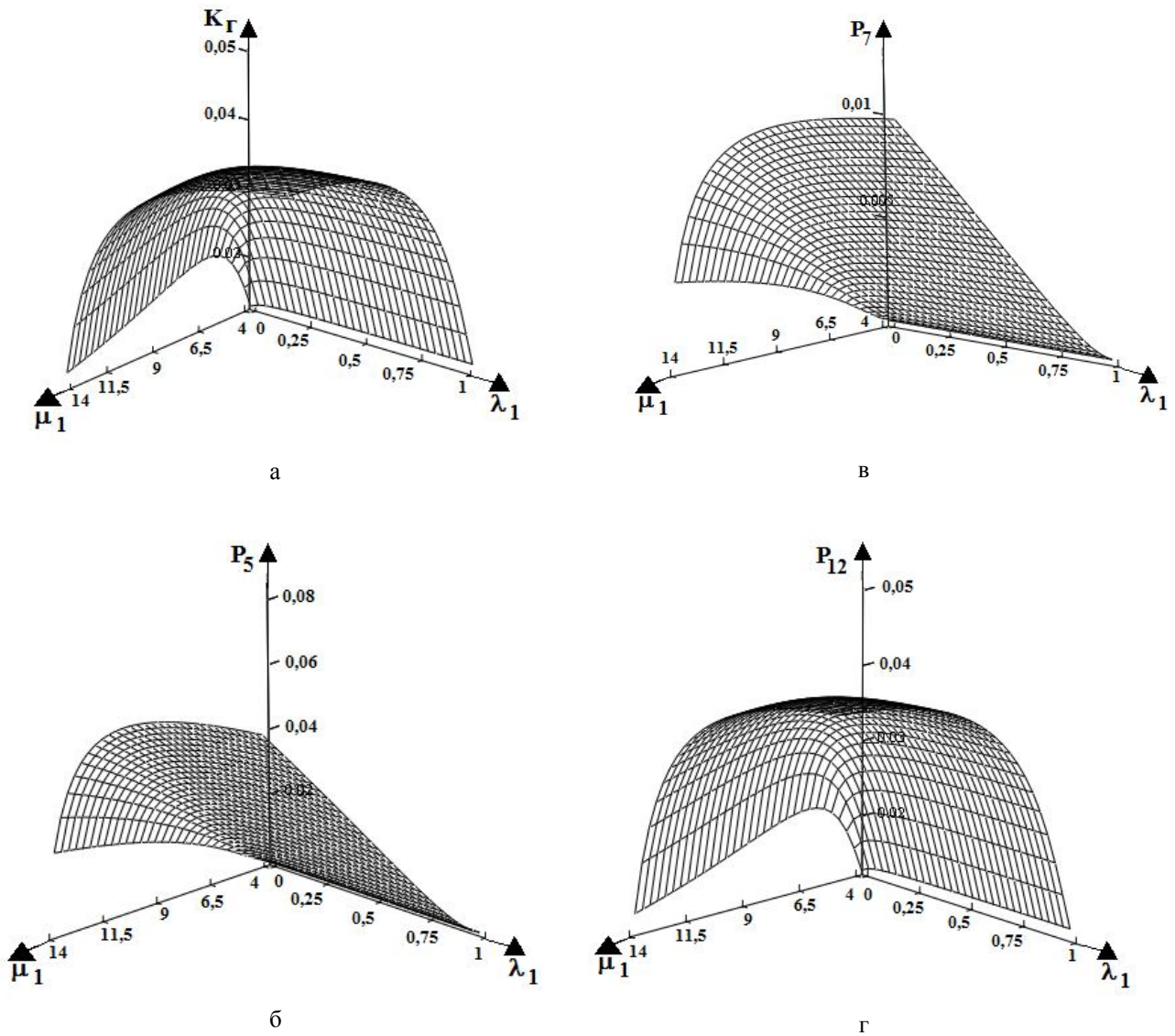
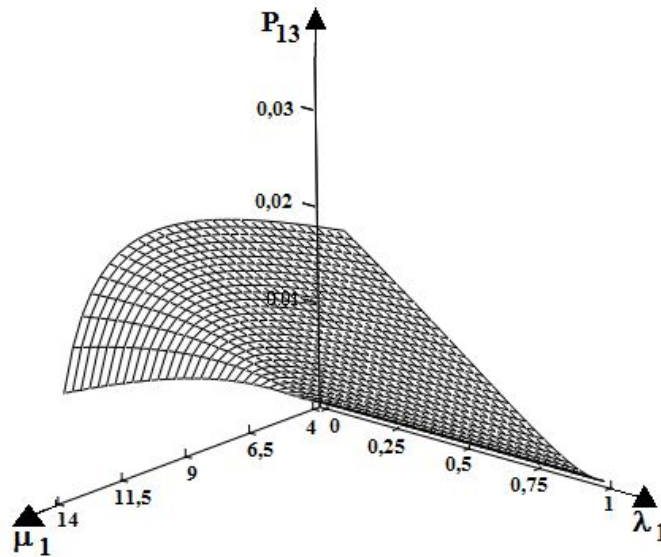


Рис. 4. Зависимости $P_i(\lambda_1, \mu_1)$ для $\tau_{КТС} = 0,5$ ч



д

Рис. 4. Зависимости $P_i(\lambda_1, \mu_1)$ для $\tau_{\text{КТС}} = 0,5$ ч (окончание)

Результаты, полученные с использованием соотношений (5) – (10), свидетельствуют о низком уровне функциональной готовности КЭИ в условиях протекания аварии, когда наблюдаются массовые каскадные отказы компонентных составляющих инфраструктуры, что согласуется с реальными событиями, реально наблюдавшимися в ходе Северо-Американского Blackout.

Заключение

Предложенный авторами стохастический подход позволяет решать задачу анализа процессов протекания аварий инфраструктурных образований путем поэтапного моделирования ухудшения надежности и функциональной готовности компонентных составляющих КИ при совместном воздействии внутренних и внешних негативных факторов.

Дальнейшие перспективы предложенного подхода связаны с разработкой метода инфраструктурной компаративистики, который может быть использован как для генерирования стресс-тестов, так и для организации управления готовностью критических энергетических инфраструктур по техническому мегасостоянию.

Литература

1. *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. – 641 с.*

2. *Информационные технологии для критических инфраструктур [Текст] / Под ред. А.В. Скоткова. – Севастополь, СевНТУ, 2012. – 306 с.*

3. *Ferreira, F. Comparison of level-crossing times for Markov and semi-Markov processes [Text] / F. Ferreira, Pacheco // A. Stat & Probab Lett. – 2007. – 77(2). – P. 151 – 157.*

4. *Mercier, S. Numerical bounds for semi-Markovian quantities and application to reliability [Текст] / S. Mercier // Methodol and Comput in Appl Probab. – 2008. – 10(2). – P. 179 – 198.*

5. *Kolowrocki, K. Preliminary approach to safety analysis of critical infrastructures [Text] / K. Kolowrocki, J. Soszynska // Summer Safety & Reliability Seminars. J of Pol Saf and Reliab Assoc. – 2012. – № 3(1). – P. 73 – 88.*

6. *Cinque, M. Automated Generation of Performance and Dependability Models for the Assessment of Wireless Sensor [Text] / M. Cinque, D. Cotroneo, C. Di Martino // IEEE Transactions on Computers, 5 May 2011, DOI:10.1109/TC.2011.96, IEEE Computer Society Press.*

7. *Pierrantuono, R. Software Reliability and Testing Time Allocation: An Architecture-Based Approach [Text] / R. Pierrantuono, S. Russo, Kishor S. Trivedi // IEEE Transactions of Software Engineering. – 2010. – vol. 36, no. 3, – P. 323 – 337.*

8. *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.*

9. *Understanding Failures in International Safety-Critical Infrastructures: A Comparison of European and North American Power Failures [Электронный ресурс] / Chris. W. Johnson. – Access regime:*

http://www.dcs.gla.ac.uk/~johnson/papers/Blackout_Comparison/Johnson_Power_Infrastructure.pdf.

10. Johnson Chris. W. *Establishing public policy as a primary cause of engineering failure in national infrastructures* [Электронный ресурс] / Chris. W. Johnson. – Access regime: http://www.dcs.gla.ac.uk/~johnson/papers/Blackout_Comparison.

11. Бронштейн, И.Н. *Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ* [Текст] /

И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

12. McCabe, T. *A Complexity Measure* [Text] / T. McCabe // *IEEE Transactions on Software Engineering*. – 1976. – Vol. 4, NoSE-2. – P. 308 – 320.

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

Поступила в редакцию 4.03.2013, рассмотрена на редколлегии 2.04.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан факультета радиоэлектронных систем В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

НАПІВМАРКІВСЬКА МОДЕЛЬ АВАРІЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

О.В. Іванченко, В.С. Харченко, Д.Ю. Бірюков

Представлена математична модель аварії критичної інфраструктури (КІ), яка враховує спільний вплив зовнішніх та внутрішніх факторів. Оцінка рівня надійності інфраструктури виконана за умови виникнення та проходження каскадних відмов компонентних складових КІ. За результатами математичного моделювання отримано кількісні оцінки показників функціональної готовності і надійності КІ для відомого сценарію розвитку аварії критичної енергетичної інфраструктури. У якості можливого сценарію розглянуто аварію Північноамериканської енергетичної інфраструктури, яка відбувалась у серпні 2003 року. Фазовий простір отриманої напівмарківської моделі окрім класичних станів відмов, відновлювань, контролю технічного стану включає стани порушення, інформаційної та функціональної уязвленості.

Ключові слова: критична інфраструктура, каскадні відмови, сценарій розвитку аварії, напівмарківська модель.

SEMI-MARKOV MODEL OF CRITICAL INFRASTRUCTURES ACCIDENT

O.V. Ivanchenko, V.S. Kharchenko, D.U. Birukov

A mathematical model of an accident of critical infrastructure (CI) is proposed, which takes into account the combined effects of external and internal factors. Assessing the level of reliability of the infrastructure is performed in conditions of a cascading failures of CI. According to the results of mathematical modeling was got the quantitative assessment of indicators of functional readiness and reliability of the CI for a given scenarios of the development accident of critical energy infrastructure. North American Blackout which was on the August 2003 is analyzed. Phasing space of the Semi-Markov model besides classical states, in particular failure, remain, control technical state includes new states such as violation, information and functional vulnerability.

Key words: critical infrastructure, cascading failures, scenarios of the development accident, Semi-Markov model.

Іванченко Олег Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетики и вычислительной техники, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина, e-mail: vmsu12@gmail.com.

Харченко Вячеслав Сергеевич – заслуженный изобретатель Украины, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: v.kharchenko@khai.edu.

Бірюков Дмитрій Юрьевич – соискатель каф. компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aharxot@gmail.com.