

УДК 62-192:004.942

О.В. ИВАНЧЕНКО, В.В. БОЧАРОВА

*Севастопольский национальный технический университет, Украина***ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР**

Выполнено стохастическое моделирование процессов изменения уровня надежности критических энергетических инфраструктур (КЭИ) при их использовании по назначению в ситуациях, близких к аварийным. Предложен подход к обоснованию предельных величин показателей надежности КЭИ. Предлагаемый авторами подход позволяет решать задачу обеспечения требуемого уровня надежности критических энергетических инфраструктур путем обоснования предельных величин средней наработки между отказами и времени восстановления компонентных составляющих КЭИ с использованием результатов контроля их технического состояния.

Ключевые слова: критические энергетические инфраструктуры, коэффициент готовности, марковский процесс, надежность.

Введение

Постоянный рост объемов вырабатываемой электроэнергии, сопровождающийся ростом функциональной напряженности, сложности и масштабов решаемых задач, является характерной особенностью использования по назначению современных энергетических инфраструктур (ЭИ), которые оказывают чрезвычайно важное влияние на национальную безопасность государства. Сама же проблема обеспечения безопасного, надежного использования по назначению критических энергетических инфраструктур (КЭИ) носит глобальный характер. Об актуальности указанной проблемы свидетельствуют последствия аварий на АЭС Фукусима – 1 (Япония, 2011 г.); на Саяно-Шушенской ГЭС (Россия, 2009 г.); аварий энергетических систем США и Канады (в августе 2003 г.) и т.д. Поэтому вызывает повышенный интерес обобщенный анализ аварий, инцидентов КЭИ, выполненный в [1].

Однако некоторые аспекты проблемы обеспечения надежности, безопасности сложных технических систем, инфраструктур [2,3] требуют уточнения и детального изучения. В частности, проблеме идентификации, снижения частоты возникновения и устранения каскадных отказов КЭИ посвящена работа [4], в которой авторы, проанализировав угрозы, уязвимости искусственного, естественного происхождения (в сезон ураганов) для различных регионов США, оценили устойчивость КИ и выработали рекомендации по обеспечению безопасности соответствующих секторов инфраструктуры.

Целью статьи является рассмотрение стохастического подхода для моделирования процессов использования по назначению критических энергетических

инфраструктур в ситуациях, близких к аварийным, с последующим решением задачи обоснования предельных величин их показателей надежности.

Изложение основного материала

Исходные положения. В основу модели положен принцип аналитико-стохастического моделирования, использование которого позволяет описывать процессы изменения технического состояния электроэнергетических систем как компонентных составляющих КЭИ [5].

Анализ технических и экономических причин наиболее крупных аварий последнего десятилетия [4,6] свидетельствует об отсутствии зависимости технического состояния КЭИ от «предыстории». Например, причинно-следственный анализ событий аварии Североамериканской энергетической инфраструктуры (Blackout) подтверждает: а) на момент 2003 г., так же как и двадцать лет тому назад не инвестировались проекты по введению в строй высоковольтного оборудования (подстанции, ЛЭП и т.д.); б) пиковые нагрузки на момент протекания аварии 2003 г. не превышали предельно допустимые. Кроме того, известно, что на компонентных составляющих КЭИ проводились мероприятия технического обслуживания, ремонта с использованием результатов контроля технического состояния (КТС), вследствие чего потоки отказов и восстановлений изделий (систем) претерпевали разрежение [7]. Указанные обстоятельства являются предпосылкой для представления модели КЭИ в виде непрерывной марковской цепи с дискретными состояниями [1]. Таким образом, законы распределения интервалов безотказной

работы и восстановлений КЭИ можно рассматривать как экспоненциальные с интенсивностями $\lambda = 1/T_0$ и $\mu = 1/T_B$, где T_0 – средняя наработка на отказ, T_B – среднее время восстановления.

Модель КЭИ с ненагруженным резервированием. Для реализации аналитико-стохастического моделирования рассмотрим следующие состояния КЭИ: S_0 – инфраструктура работоспособна (РС), проводится плановый КТС; S_1 – инфраструктура неработоспособна (НРС) вследствие внезапного отказа, по результатам КТС проводится текущий ремонт; S_2 – инфраструктура НРС, находится в состоянии скрытого отказа.

Граф состояний КЭИ с ненагруженным резервированием для случая внезапных и скрытых отказов ее компонентных составляющих представлен на рис. 1.

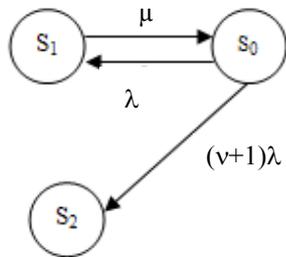


Рис. 1. Граф состояний КЭИ с ненагруженным резервированием

Соответствующие интенсивности переходов определим как λ и μ . Дополнительно введем параметры: ν – признак резервирования ($0 \leq \nu \leq 1$); r – число ремонтных бригад. Тогда, для $\nu = 0$ (при ненагруженном резервировании или его отсутствии), $r = 1$ система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена [1] записывается в виде

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda(\nu + 2)P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda(\nu + 1)P_0(t); \\ \sum_{i=0}^2 P_i(t) = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Решая систему дифференциальных уравнений (1) для начальных состояний $P_0(0) = 1$, $P_1(0) = P_2(0) = 0$ методом Крамера с применением прямого и обратного преобразования Лапласа, получим следующие соотношения:

$$P_0 = \frac{1}{\lambda} (C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t}),$$

$$P_1 = \frac{1}{\mu} (B_1 e^{-\alpha_1 t} + B_2 e^{-\alpha_2 t}),$$

$$P_2 = 1 - P_0 - P_1,$$

где

$$\xi = \frac{\mu + 2\lambda}{2\lambda\mu} \sqrt{\lambda\mu}, \quad T = \frac{1}{\sqrt{\lambda\mu}}, \quad \alpha_1 = \frac{1}{T_1},$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{T_2}, \quad \tau = \frac{1}{\mu}, \quad T_1 = T \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right),$$

$$T_2 = T \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right), \quad C_1 = \frac{T_1 - \tau}{T_1(T_1 - T_2)},$$

$$C_2 = \frac{\tau - T_2}{T_2(T_1 - T_2)}, \quad B_1 = \frac{1}{(T_1 - T_2)}, \quad B_2 = \frac{1}{(T_2 - T_1)}.$$

Графики зависимости $P_i(T_0, T_B)$, где $i = 0, 2$, для продолжительности эксплуатации $t = 720$ ч представлены на рис. 2.

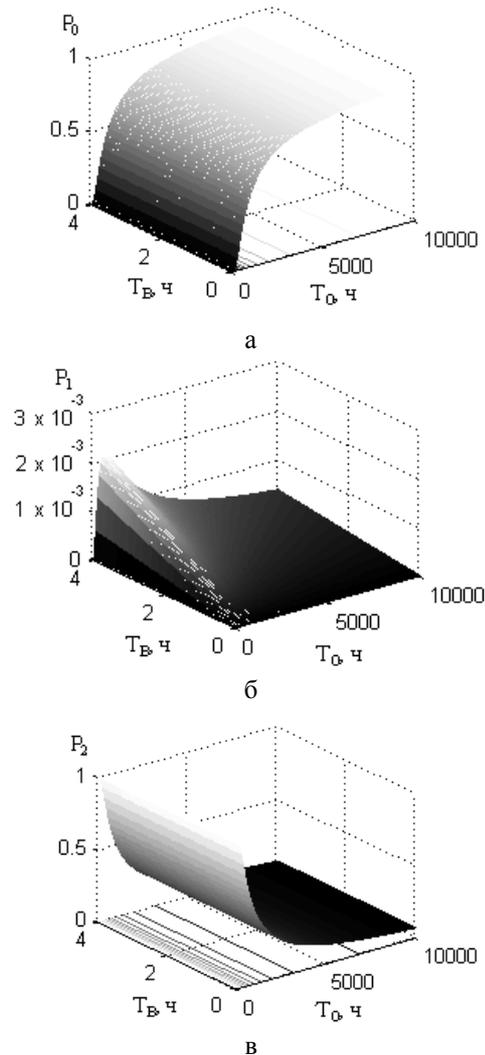


Рис. 2. Зависимости $P_i(T_0, T_B)$ для $t = 720$ ч

Обобщенные результаты оценки предельных величин средней наработки на отказ T_0 (интенсив-

ности отказов λ) и среднего времени восстановления T_B компонентов КЭИ для фиксированного значения нестационарного коэффициента готовности (НКГ) ($K_r(t) = P_0(t)$) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предельные величины показателей надежности КЭИ

Продолжительность эксплуатации, месяцы	НКГ	T_B , ч	λ , 1/ч
1	0,99	2	$0,6666 \cdot 10^{-4}$
	0,95		$0,1298 \cdot 10^{-4}$
3	0,99		$0,2272 \cdot 10^{-4}$
	0,95		$0,5208 \cdot 10^{-5}$
6	0,99		$0,12195 \cdot 10^{-4}$
	0,95		$0,33557 \cdot 10^{-5}$

Полученные результаты (табл. 1) еще раз подтверждают [1] необходимость выполнения комплекса организационно-технических мероприятий по устранению скрытых отказов и могут быть использованы для обоснования рациональных сроков использования по назначению КЭИ с учетом фактора старения их компонентных составляющих.

Модель протекания аварии Североамериканской КЭИ. Рассмотрим возможности практического использования предлагаемого методического аппарата для анализа последствий аварий и инцидентов КЭИ. С этой целью получим оценки показателей надежности компонентов КЭИ для одного из эпизодов Blackout (2003 г.). Дополнительно проведенный анализ технических и экономических причин возникшей аварии, выполненный в [1,4,6], позволяет рассматривать поток заявок по экспортированию, импортированию электроэнергии как простейший. Тогда, без нарушения последовательности событий упрощенная логическая схема протекания аварии с учетом состояний КЭИ может быть представлена в виде, изображенном на рис. 5.



Рис. 5. Состояния и события КЭИ (Североамериканский Blackout, 2003 г.)

Воспользуемся приведенными умозаключениями и трансформируем логическую схему (рис. 5) в соответствующий граф состояний. Для полученного

графа состояний (рис. 6) выполним математическое моделирование непрерывной марковской цепи.

На графе, представленном на рис. 6, изображены следующие состояния: E_0 – работоспособное состояние инфраструктуры; E_1 – состояние информационной уязвимости компонентов инфраструктуры; E_2 – состояние функциональной уязвимости компонентов инфраструктуры; E_3 – состояние инфраструктурной уязвимости; E_4 – состояние инфраструктурного отказа.

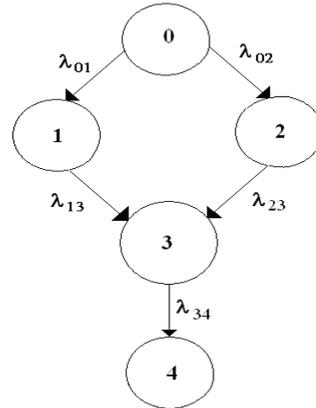


Рис. 6. Граф состояний марковской цепи

В качестве показателя надежности определим значение НКГ ($K_r(t) = P_0(t)$), учитывая $M(t) \neq M(t + \Delta t)$, где $M(t)$ – математическое ожидание случайной величины для случая стационарного процесса. Для решения этой задачи в соответствии с представленным графом (рис. 6) запишем систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена в виде [8]

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -(\lambda_{01} + \lambda_{02})P_0(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{01}P_0(t) - \lambda_{13}P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{02}P_0(t) - \lambda_{23}P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{34}P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{34}P_3(t); \\ \sum_{i=0}^4 P_i(t) &= 1. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

По аналогии с (1) задачу решим, используя метод Крамера, при следующих начальных условиях: $P_0(0) = 1, \forall P_i(0) = 0$, где $i = 1, \dots, 4$. Применяв обратное преобразование Лапласа, получили нетривиальные математические решения. Результаты расчетов в виде соответствующих графиков зависимостей вероятностей пребывания КЭИ в нестационарных состояниях E_i , где $i = \overline{0,4}$, представлены на рис. 7.

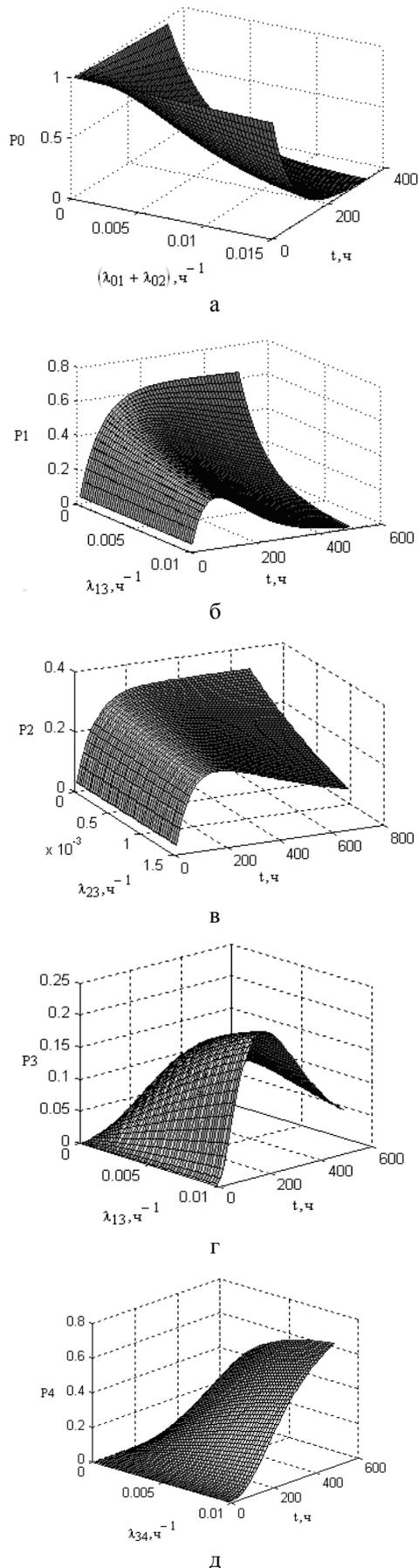


Рис. 7. Зависимости $P_i(\lambda, t)$, где $i = \overline{0,4}$

Аналитически рассчитанные и наглядно представленные (рис. 7) оценки вероятности инфраструктурного отказа $P_4(t)$ могут быть использованы для определения уровня надежности и риска при условии, что апостериори известна величина показателей тяжести последствий отказов КЭИ. В качестве оценки тяжести последствий для КЭИ предлагается использовать информацию о количестве отключенных потребителей, которая содержится в [9].

В дальнейшем для построения опорной модели предлагается использовать оптимизационный критерий «стоимость-эффективность», который записывается в виде

$$\xi = \begin{cases} \max_{\psi} E(MS), \\ C_{\min_{\delta\delta}} \leq \tilde{N}_{\delta\delta} \leq C_{\max_{\delta\delta}}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi = \{l, s, r, u, q\},$$

где E – обобщенный показатель эффективности использования по назначению КЭИ;

$l \in L, L$ – множество задач, решаемых КЭИ;

$s \in S, S$ – множество технических состояний, в которых может находиться КЭИ;

$r \in R, R$ – множество режимов эксплуатации КЭИ;

$u \in U, U$ – множество стратегий управления КЭИ;

$q \in Q, Q$ – множество структур КЭИ;

$C_{\min_{\text{тр}}}, C_{\max_{\text{тр}}}$ – минимально и максимально допустимые эксплуатационные расходы.

Заключение

Применение стохастического подхода для моделирования процессов эксплуатации критических энергетических инфраструктур предоставляет широкие возможности при решении задач обеспечения эффективного использования по назначению КЭИ при приоритете их безопасности и надежности. Предлагаемый авторами подход позволяет решать задачу обеспечения требуемого уровня надежности критических энергетических инфраструктур путем обоснования предельных величин средней наработки между отказами и времени восстановления компонентных составляющих КЭИ с использованием результатов контроля их технического состояния.

Дальнейшие перспективы аналитико-стохастического моделирования 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. – 641с.*
2. *Kharchenko, V.S. Dependability and Dependable Systems: Elements of Methodology [Text] / V.S. Kharchenko, // Radioelectronics and Computer Systems. –2006. – № 5 (17). – P. 7-19.*
3. *Kharchenko, V.S. Diversity-Scalable Decisions for FPGA-based Safety-Critical I&Cs: from Theory to Implementation / V.S. Kharchenko, A.A. Stora, E.S. Bakmach // Proceedings of NPIC&HMIT 2009, Knoxville, USA, April 5-9, 2009.*
4. *Cascading Infrastructure Failures: Avoidance and Response. The National Academy of Sciences 2100 C St. N.W., Washington, D.C., May 16, 2007, 262.*
5. *Скопинцев, В.А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть [Текст] / В.А. Скопинцев. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 322 с.*
6. *Johnson, C.W. Understanding Failures in International Safety-Critical Infrastructures: A Comparison of European and North American Power Failures [Electronic resource] / C.W. Johnson. – Available on: <http://www.dcs.gla.ac.uk/~johnson>. – 2.03.2012.*
7. *Дедков, В.К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем [Текст] / В.К. Дедков, Н.А. Северцев. – М.: Высшая школа, 1976. – 406 с.*
8. *Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов [Текст] / А.Б. Петрученко, С.В. Бочкарев, А.В. Ромодин, Д.К. Елтышев // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 21 – 24.*
9. *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, April 2004. – 228 p.*

Поступила в редакцию 2.03.2012

Рецензент: канд. техн. наук, доцент В. Левашенко, University of Žilina, Žilina, Словакия.

ОБГРУНТУВАННЯ ГРАНИЧНИХ ВЕЛИЧИН ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ КРИТИЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНФРАСТРУКТУР

О.В. Іванченко, В.В. Бочарова

Виконано стохастичне моделювання процесів зміни рівня надійності критичних енергетичних інфраструктур (КЕІ) при їх використанні за призначенням в ситуаціях, котрі близькі до аварійних. Запропоновано підхід до обґрунтування граничних величин показників надійності критичних енергетичних інфраструктур. Пропонований авторами підхід дозволяє вирішувати задачу забезпечення необхідного рівня надійності критичних енергетичних інфраструктур шляхом обґрунтування граничних величин середнього напрацювання між відмовами і часу відновлення компонентних складових КЕІ з використанням результатів контролю їх технічного стану.

Ключові слова: критичні енергетичні інфраструктури, коефіцієнт готовності, марківський процес, надійність.

VALIDATION OF RELIABILITY LIMIT VALUES OF CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURE

O.V. Ivanchenko, V.V. Bocharova

Stochastic modeling of the process of reliability level change for the critical energy infrastructures is presented. Dependences of the reliability parameters of energy infrastructure in cases of unloaded reserve are found. Method validation of reliability limit values of critical energy infrastructure is offered. Offered approach authors allows to decide the task of providing of the required level of reliability of critical power infrastructures by the ground of maximum sizes of middle work between refuses and time of renewal of component constituents of critical energy infrastructures with the use of results of control of their technical state.

Key words: critical energy infrastructure, pointwise readiness indexes, Markov process, reliability.

Іванченко Олег Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедри кібернетики і вичислительної техніки, Севастопольський національний технічний університет, Севастополь, Україна, e-mail: vmsu10@rambler.ru.

Бочарова Вікторія Віталівна – магістрант кафедри кібернетики і вичислительної техніки, Севастопольський національний технічний університет, Севастополь, Україна: e-mail: valeriacvictrix@mail.ru.