

конкурировать по массогабаритным и ресурсным характеристикам с установками других видов преобразования энергии, например, радиоизотопными генераторами, солнечными батареями, электрохимическими генераторами и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуш И.П., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е. и др. Космическая термоэмиссионная ЯЭУ по программе «Топаз». Принципы конструкции и режимы работы. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 4, с. 211—214.
2. Корнилов В.А. Термоэмиссионный реактор-преобразователь. Патент РКК «Энергия» № 2165656, кл. G21D 7/04, приоритет от 26.08.99, опубл. 20.04.2001. — Бюл. Рос. агентства по патентам и товарным знакам «Изобретения. Полезные модели», 2001, № 11, с. 381.
3. Иванов Е.А., Ионкин В.И., Раскач Ф.П. и др. Перспективы применения ядерного топлива на основе ^{233}U в КЯЭУ. Тезисы докладов Межд. семинара «Космическая энергетика XXI века (Ядерный аспект)». Обнинск—Подольск, 17—20 ноября 1998 г., с. 54—55.

Поступило в Редакцию 23.02.01

УДК 629.5.021,629.5.05

ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ АЭС

Морозов В.И. (Правительство Ленинградской области)

Дальнейшее повышение безопасности, надежности и экономичности функционирования АЭС, реализация стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию неразрывно связаны с широким применением средств и комплексов технического диагностирования. Продление срока службы действующих энергоблоков АЭС в условиях ужесточающихся требований безопасности также требует более точного знания технического состояния оборудования, следовательно, использования диагностического обеспечения.

Принимая во внимание высокую стоимость средств технического диагностирования, существенные затраты на их эксплуатацию, разнообразие и большое число элементов оборудования АЭС, в работе [1] отмечается, что в настоящее время уже само обоснование технико-экономического эффекта от применения средств технического диагностирования стало одной из важных теоретических задач технической диагностики. Ее решение позволит оптимально распорядиться финансовыми ресурсами, выделенными на оснащение АЭС средствами технического диагностирования.

По физической природе, содержанию техническое диагностирование вследствие более точного определения технического состояния уменьшает неопределенность состояния элементов и технической системы в целом. Поэтому методология расчета технико-экономического эффекта должна учитывать влияние изменения неопределенности состояния элемента или их совокупности на неопределенность состояния системы. Это подразумевает установление между ними функциональной взаимосвязи в виде математического выражения.

Специалисты, занимающиеся исследованиями в интересах обеспечения заданных показателей надежности АЭС, как, например, вероятности безотказной работы найдут в приведенном примере общее. Так, повышение вероятности безотказной работы технического объекта вследствие одинакового приращения вероятности безотказной работы отдельных его элементов различно и дополнительно зависит от структуры и организации АЭС, режимов функционирования.

Установление функциональной взаимосвязи между неопределенностью состояния элементов и системы в целом имеет важное значение в системотехнике не только в интересах моделирования и обеспечения (за счет конструктивных изменений и организационно-технических мероприятий) заданного уровня свойств сложных технических объектов различного назначения, но и в расширении возможностей общих методов системного анализа, теории исследования операций, например, при решении задач планирования (управления проектами) сетевыми методами с учетом риска, общем решении проблемы в области системотехники, сформулированной в виде решения задач организованной сложности [2, 3]: при их решении существенно такое свойство изучаемых объектов, как организация и структура.

Приведем математическое выражение, связывающее неопределенность состояния элементов и системы в целом, на основе дисперсии. Рассмотрим техническую систему, состоящую из n элементов, имеющую какую-то структуру и организацию, примем вероятность безотказной работы элементов технической системы $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$, при этом состояние работоспособности элементов системы независимо одно от другого. В этом случае состояние элемента системы описывается бернуллиевской [4] случайной величиной, принимающей два значения 1 и 0 с вероятностью работоспособного состояния p и отказа $q = (1 - p)$.

Дисперсия бернуллиевской случайной величины имеет следующий вид: $D_i = p_i q_i = p_i(1 - p_i)$. Дисперсия, как и энтропия бернуллиевской случайной величины, обладает свойством симметричности относительно p, q и экстремальности: $D(p, 1 - p) \leq D(1/2, 1/2)$ (максимальное значение принимает при $p_i = 0,5$). Сумма n независимых бернуллиевских случайных величин имеет дисперсию

$$D = \sum_{i=1}^n p_i(1 - p_i)$$

и принимает максимальное значение при $p_i = 0,5$ (свойство экстремальности).

Между энтропией и дисперсией существует функциональная взаимосвязь

$$H_i = D_i \left(2,5 + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{(1-p)^{n-1} + p^{n-1}}{n} \right).$$

В то же время дисперсия обладает дополнительным достоинством по причине установления на ее основе достаточно простого выражения, связывающего дисперсию системы и составляющих ее элементов:

$$D_c = \sum_{i=1}^n D_{p_i}^2 + \sum_{i,j \in C_n^2} D_i D_j \xi_{i,j}^2 + \dots \sum_{i,j,s \in C_n^k} D_i D_j \dots D_s \xi_{i,j,\dots,s}^2 + \dots, \quad (1)$$

где $\xi_{i,j,\dots,s} = \partial^k p_c / \partial p_i \partial p_j \dots \partial p_s$ — k -кратная совместная значимость, частная производная от вероятностной функции работоспособности системы по набору переменных $p_i, p_j, \dots, p_s$ (показатель важности по Бирнбауму); $p_c = f(p_1, p_2, \dots, p_n)$ — вероятностная функция работоспособности системы; $D_i = p_i(1 - p_i)$; $D_c = p_c(1 - p_c)$ — дисперсия элемента и системы в целом; $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ — число сочетаний из n элементов по k .

При этом выполняется тождество, определяющее дисперсию системы двумя разными способами через вероятностную функцию работоспособности системы p_c : $D_c = p_c(1 - p_c)$ или выражение (1):

$$p_c(1 - p_c) = \sum_{i=1}^n D_{p_i}^2 + \sum_{i,j \in C_n^2} D_i D_j \xi_{i,j}^2 + \dots \sum_{i,j,s \in C_n^k} D_i D_j \dots D_s \xi_{i,j,\dots,s}^2 + \dots$$

Из выражения (1) следует, что дисперсия организованной системы состоит из различных композиций дисперсии элементов системы, взвешенных с помощью весовых коэффициентов — квадратов k -кратных совместных значимостей. Математические выражения весовых коэффициентов содержат в себе структуру и организацию технической системы и имеют объективный характер в отличие от весовых коэффициентов, принимаемых на основе методов экспертных оценок.

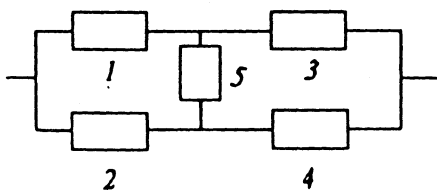


Схема мостиковой структуры электропитания

В качестве демонстрационного примера рассмотрим простейшую мостиковую структуру, приведенную на рисунке и состоящую из пяти элементов: 1, 2 — источники электроэнергии; 3, 4 — щиты распределения электроэнергии; 5 — кабельная перемычка для обеспечения электроэнергией, подключенная к одному из щитов. Система считается работоспособной, если хотя бы на одном из кратчайших путей успешного функционирования элементы системы работоспособны. Тогда вероятностная функция работоспособности системы имеет вид

$$p_c = p_1 p_3 + p_2(1 - p_3)p_4 + (1 - p_1)p_2 p_3 p_4 + p_1(1 - p_2)(1 - p_3)p_4 p_5 + (1 - p_1)p_2 p_3(1 - p_4)p_5.$$

Примем вероятность безотказной работы элементов системы на временном интервале τ $p_1 = 0,9$, $p_2 = 0,8$, $p_3 = 0,85$, $p_4 = 0,95$, $p_5 = 0,9$. Определим взвешенные дисперсии (неопределенность состояния) элементов данной структуры, их вклад в неопределенность состояния системы (см. таблицу).

При расчете k -кратных совместных значимостей предварительно определим вид выражений, затем подставим соответствующие значения, например:

$$\xi_1 = \frac{\partial p_c}{\partial p_1} = p_3 - p_2 p_3 p_4 + (1 - p_2)(1 - p_3)p_4 p_5 - p_2 p_3(1 - p_4)p_5 = 0,19905;$$

$$\xi_{345} = \frac{\partial^3 p_c}{\partial p_3 \partial p_4 \partial p_5} = -p_1(1 - p_2) - (1 - p_1)p_2 = -0,26.$$

Расчетные данные

Показатель	Обозначение и/или расчетная формула	Числовое значение
1	2	3
Вероятность безотказной работы элементов системы:		
x_1	p_1	0,9
x_2	p_2	0,8
x_3	p_3	0,85
x_4	p_4	0,95
x_5	p_5	0,9
Вероятность безотказной работы системы	p_c	0,969745
Дисперсия бернуллиевской случайной величины, характеризующей состояние элементов системы:		
x_1	$D_1 = p_1(1 - p_1)$	0,09
x_2	$D_2 = p_2(1 - p_2)$	0,16
x_3	$D_3 = p_3(1 - p_3)$	0,1275
x_4	$D_4 = p_4(1 - p_4)$	0,0475
x_5	$D_5 = p_5(1 - p_5)$	0,09
Дисперсия бернуллиевской случайной величины, характеризующей состояние системы	$D_c = p_c(1 - p_c)$	0,029339635
Значимость элементов системы:		
x_1	ζ_1	0,19905
x_2	ζ_2	0,11165
x_3	ζ_3	0,0657
x_4	ζ_4	0,1511
x_5	ζ_5	0,02905
Двукратные совместные значимости элементов системы:		
x_1, x_2	ζ_{12}	-0,974
x_1, x_3	ζ_{13}	0,033
x_1, x_4	ζ_{14}	-0,041
x_1, x_5	ζ_{15}	-0,0055
x_2, x_3	ζ_{23}	-0,081
x_2, x_4	ζ_{24}	0,037
x_2, x_5	ζ_{25}	-0,124
x_3, x_4	ζ_{34}	-0,954
x_3, x_5	ζ_{35}	-0,167
x_4, x_5	ζ_{45}	-0,041
Трехкратные совместные значимости элементов системы:		
x_1, x_2, x_3	ζ_{123}	-0,14
x_1, x_2, x_4	ζ_{124}	-0,22
x_1, x_2, x_5	ζ_{125}	-0,185
x_1, x_3, x_4	ζ_{134}	-0,26
x_1, x_3, x_5	ζ_{135}	-0,23
x_1, x_4, x_5	ζ_{145}	0,71

Продолжение таблицы

1	2	3
x_2, x_3, x_4	ζ_{234}	-0,18
x_2, x_3, x_5	ζ_{235}	0,86
x_3, x_4, x_5	ζ_{345}	-0,26
x_2, x_4, x_5	ζ_{245}	-0,22
Четырехкратные совместные значимости элементов системы:		
x_1, x_2, x_3, x_4	ζ_{1234}	0,8
x_1, x_2, x_3, x_5	ζ_{1235}	0,9
x_1, x_3, x_4, x_5	ζ_{1345}	0,6
x_1, x_2, x_4, x_5	ζ_{1245}	0,7
x_2, x_3, x_4, x_5	ζ_{2345}	0,8
Пятикратная совместная значимость элементов системы x_1, x_2, x_3, x_4, x_5	ζ_{12345}	2
Взвешенная дисперсия бернуллиевской случайной величины, характеризующей состояние элементов системы:		
x_1	$D_1 \zeta_1^2$	$3,565881 \cdot 10^{-3}$
x_2	$D_2 \zeta_2^2$	$1,994516 \cdot 10^{-3}$
x_3	$D_3 \zeta_3^2$	$5,50352 \cdot 10^{-4}$
x_4	$D_4 \zeta_4^2$	$1,084482 \cdot 10^{-3}$
x_5	$D_5 \zeta_5^2$	$7,59512 \cdot 10^{-5}$
Взвешенная дисперсия по двум элементам системы:		
x_1, x_2	$D_1 D_2 \zeta_{12}^2$	$1,3660934 \cdot 10^{-2}$
x_1, x_3	$D_1 D_3 \zeta_{13}^2$	$1,24963 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_4	$D_1 D_4 \zeta_{14}^2$	$7,18627 \cdot 10^{-6}$
x_1, x_5	$D_1 D_5 \zeta_{15}^2$	$2,45025 \cdot 10^{-7}$
x_2, x_3	$D_2 D_3 \zeta_{23}^2$	$1,33844 \cdot 10^{-4}$
x_2, x_4	$D_2 D_4 \zeta_{24}^2$	$1,04044 \cdot 10^{-5}$
x_2, x_5	$D_2 D_5 \zeta_{25}^2$	$2,21414 \cdot 10^{-4}$
x_3, x_4	$D_3 D_4 \zeta_{34}^2$	$5,51189 \cdot 10^{-3}$
x_3, x_5	$D_3 D_5 \zeta_{35}^2$	$3,20026 \cdot 10^{-4}$
x_4, x_5	$D_4 D_5 \zeta_{45}^2$	$7,18628 \cdot 10^{-6}$
Взвешенные дисперсии по трем элементам системы:		
x_1, x_2, x_3	$D_1 D_2 D_3 \zeta_{123}^2$	$3,599 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_2, x_4	$D_1 D_2 D_4 \zeta_{124}^2$	$3,311 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_2, x_5	$D_1 D_2 D_5 \zeta_{125}^2$	$4,436 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_3, x_4	$D_1 D_3 D_4 \zeta_{134}^2$	$3,685 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_3, x_5	$D_1 D_3 D_5 \zeta_{135}^2$	$5,463 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_4, x_5	$D_1 D_4 D_5 \zeta_{145}^2$	$1,9395 \cdot 10^{-4}$
x_2, x_3, x_4	$D_2 D_3 D_4 \zeta_{234}^2$	$3,140 \cdot 10^{-5}$
x_2, x_3, x_5	$D_2 D_3 D_5 \zeta_{235}^2$	$1,35791 \cdot 10^{-3}$

Окончание таблицы

1	2	3
x_2, x_4, x_5	$D_2 D_4 D_5 \xi_{245}^2$	$3,311 \cdot 10^{-5}$
x_3, x_4, x_5	$D_3 D_4 D_5 \xi_{345}^2$	$3,685 \cdot 10^{-5}$
Взвешенные дисперсии по четырем элементам системы:		
x_1, x_2, x_3, x_4	$D_1 D_2 D_3 D_4 \xi_{1234}^2$	$5,581 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_2, x_3, x_5	$D_1 D_2 D_3 D_5 \xi_{1235}^2$	$1,3384 \cdot 10^{-4}$
x_1, x_3, x_4, x_5	$D_1 D_3 D_4 D_5 \xi_{1345}^2$	$1,766 \cdot 10^{-5}$
x_1, x_2, x_4, x_5	$D_1 D_2 D_4 D_5 \xi_{1245}^2$	$3,016 \cdot 10^{-5}$
x_2, x_3, x_4, x_5	$D_2 D_3 D_4 D_5 \xi_{2345}^2$	$5,581 \cdot 10^{-5}$
Взвешенная дисперсия по пяти элементам системы x_1, x_2, x_3, x_4, x_5	$D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 \xi_{12345}^2$	$3,140 \cdot 10^{-5}$
Сумма взвешенных дисперсий, вычисленная на основе выражения (1)	D_c	$2,933963 \cdot 10^{-2}$

В качестве кратких пояснений полученных результатов отметим следующее:

как и следовало ожидать, неопределенность системы, рассчитанная разными способами, равна и контрольная разность равна нулю;

дисперсии первого и пятого элемента равны, в то же время взвешенная дисперсия первого элемента почти в 50 раз больше пятого элемента, и это объясняется тем, что весовой коэффициент пятого элемента, характеризующий его важность в структуре, существенно меньше первого;

суммарные дисперсии по первому и второму элементу составляют более 50% неопределенности состояния системы. Интересно отметить следующее: примем в качестве предположения, что в результате технического диагностирования все потенциальные отказы первого и второго элементов будут обнаружены и устранены в период технического обслуживания и ремонта, т.е. вероятность безотказной работы первого и второго элементов равна 1. В этом случае взвешенная дисперсия пятого элемента станет равной нулю, т.е. переключки в составе системы не будет вносить неопределенность в состояние системы и ее необходимость в этом случае будет обоснована только интересами живучести данной технической системы.

В заключение необходимо еще раз отметить, что наличие в математических моделях технико-экономического эффекта показателей неопределенности устанавливает некоторую логическую последовательность целей и задач технической диагностики, поскольку техническое диагностирование как процесс определения технического состояния объекта с заданной точностью направлено прежде всего на уменьшение неопределенности состояния объекта. Приведенные результаты являются составной частью общего решения задачи построения математических моделей расчета технико-экономического эффекта от внедрения средств технического диагностирования не только АЭС, но и сложных технических объектов разного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В.И. Приоритетные направления внедрения диагностического обеспечения на АЭС: — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 4, с. 311—313.
2. Клар Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990.
3. Weaver W. Science and complexity. — American Sci., 1968, v. 36, p. 536—544.
4. Ширяев А.Н. Вероятность. М.: Наука, 1989, с. 45.

Поступило в Редакцию 5.01.01

УДК 536.248.2

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ О КРИЗИСЕ КИПЕНИЯ ВОДЫ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Ивашкевич А.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

Для теплогидравлических расчетов парогенерирующих кольцевых каналов необходимо знать критический тепловой поток $q_{кр}$. В работе [1] предложена эмпирическая формула для расчета $q_{кр}$ при вынужденном течении воды в кольцевых каналах. Цель настоящей работы — предложить физически обоснованную формулу.