

УДК 621.311

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Канд. техн. наук, доц. КАРНИЦКИЙ Н. Б.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Обеспечение эффективности энергопроизводства невозможно без решения проблем повышения, или, по крайней мере, сохранения надежности основного оборудования ТЭС на требуемом уровне в условиях активной выработки паркового ресурса. Согласно [1], энергомощность, исчерпавшая парковый ресурс, к 2005 г. для ТЭС РАО «ЕЭС России» с энергоблоками 250–300 МВт составит 23,3 млн. кВт или 79,8 %, к 2010 г. процент износа составит 94,7 % при 7000 часов работы в год. В этой связи непринятие мер по сохранению надежности оборудования ТЭС может поставить всю экономику РФ в тяжелейшее положение. Такая же ситуация характерна и для энергетики Республики Беларусь. На пороге XXI в. изношенность генерирующих мощностей ТЭС концерна «Белэнерго» составит 52 % и более.

Продление ресурса возможно различными путями, в том числе заменой отдельных деталей и узлов котельного и турбинного оборудования. По данным отраслевых институтов, в частности ВТИ, такой путь реновации позволит увеличить парковый ресурс для энергоблоков 250–300 МВт на 30–50 тыс. часов, однако это приведет к обострению проблемы замены основных фондов в перспективе и вызовет увеличение затрат на диагностический контроль. В этой связи аналитическая оценка надежности действующего оборудования ТЭС путем определения отдельных ее показателей является необходимой.

В качестве примера проанализируем работу энергоблоков К-300-240 ГРЭС-2400 МВт, на первой очереди которой установлены четыре дублирующего блока с двухкорпусными котлами ТГМП-114, а на второй – четыре моноблока с котлами ТГМП-314, 324. Вначале произведем оценку живучести основного оборудования анализируемой ГРЭС по величине средней частоты отказов  $\omega$  за 20-летний период функционирования указанных энергоблоков. Используя зависимости, приведенные в [2], определим частоту отказов  $\omega$  по формуле

$$\omega = \frac{n}{t}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество отказавших энергоблоков за анализируемый интервал;

$m$  – то же, состояний энергоблоков.

Условная вероятность состояния определялась по зависимости

$$P\{n_1/m_1\} = \frac{m_1!m_2!n!!}{n_1!l_1!n_2!l_2!m!}. \quad (2)$$

Здесь  $P_1 = P_2$ , так как различия между  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при отказах несущественны;

$l$  – число исправных энергоблоков за анализируемый интервал;

индекс «1» присвоен показателям состояния дубль-блоков, «2» – моноблокам;

уровень значимости принят  $\varepsilon = 0,01$ .

Исходные данные о работе энергоблоков приведены в табл. 1. Средняя частота отказов за указанный период составила для дубль-блоков 0,533, а для моноблоков – 0,890 1/год. Таким образом, статистикой исследований подтверждено мнение о более высокой живучести дубль-блоков.

Таблица 1

Год	$P\{n_1/n\}$	Количество энергоблоков			$\omega$ , 1/год	$\bar{\omega} = \sum n / (m\Delta t)$ , 1/год	Примечание
		Отказавших	Исправных	Всего			
1	2	3	4	5	6	7	8
1976	0,4545	6/4	0/1	6/5	1/0,8	0,909	В числителе – сведения об энергоблоках с двухкорпусными котлами ТГМП-114. В знаменателе – моноблоки с котлами ТГМП-314, 324
1977	0,5000	3/4	1/2	4/6	0,75/0,66	0,700	
1978	1,0000	7/8	0/0	7/8	1/1	1,000	
1979	0,0000	6/5	2/2	7/7	0,857/0,714	0,876	
1980	1,0000	6/13	0/0	6/13	1/1	0,100	
1981	0,3000	2/5	2/1	4/6	0,5/0,833	0,700	
1982	0,4545	0/5	4/2	4/7	0/0,714	0,455	
1983	0,2778	4/13	1/0	5/13	0,8/1	0,944	
1984	0,1450	2/10	2/1	4/11	0,5/0,909	0,800	
1985	0,0000	1/9	3/0	4/19	0,25/0,473	0,435	
1986	0,0000	0/7	4/0	4/17	0/0,412	0,333	
1987	0,0834	2/5	3/0	5/5	0,4/1	0,700	
1988	0,3571	2/4	2/1	4/5	0,5/0,8	0,666	
1989	0,1120	2/7	3/1	5/8	0,4/0,875	0,692	
1990	0,3571	2/4	2/1	4/5	0,5/0,8	0,666	
1991	0,3174	1/3	3/2	4/5	0,25/0,6	0,444	
1992	0,0909	2/8	2/0	4/8	0,5/1	0,833	
1993	0,2381	0/5	4/1	4/6	0/0,833	0,500	
1994	0,0000	0/11	4/0	4/11	0/1	0,733	
1995	0,5128	4/7	1/1	5/8	0,8/0,875	0,846	
1996	0,2381	1/4	3/1	4/5	0,25/0,8	0,555	
1997	0,2545	2/6	2/1	4/7	0,5/0,857	0,727	
Итого		55/147	48/18	103/165	Среднее: 0,533/0,89		

Определив частоту отказов на границах интервалов по формуле

$$\bar{\omega} = \frac{\sum n}{m\Delta t}, \quad (3)$$

среднюю частоту отказов внутри интервала по выражению

$$\omega^* = [\bar{\omega}(t_{i-1}, t_i) + \bar{\omega}(t_i, t_{i-1})]/2, \quad (4)$$

получим необходимые данные для построения статистической функции распределения частоты отказов  $\omega$  (табл. 2), которая имеет вид

$$\Omega^*(t) = \int_0^t \omega^* dt, \quad (5)$$

а ее графическое изображение, построенное по данным автора, приведено на рис. 1. Определим стандартный закон распределения, которому подчиняется зависимость (5). Предположим, что зависимость  $\Omega^*(t)$  подчиняется пуассоновскому распределению

$$P^*(t) = 1 - \exp[-\Omega^*(t)] = 1 - e^{-\Omega^*t}. \quad (6)$$

Таблица 2

Статистическая функция распределения вероятности отказов энергоблоков, 1/год

$t_{i-1}$	$t_i$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\bar{\omega} = \sum n / (m\Delta t)$	$\omega^*$	$\omega^*\Delta t$	$\Omega^*(t)$
—	1976	0	0	0	0,9090	0	0
1976	1977	1	0,909	0,909	0,9090	0,9090	0,9090
1977	1978	»	0,700	0,700	0,8045	0,8045	1,7135
1978	1979	»	1,000	1,000	0,8500	0,8500	2,5635
1979	1980	»	0,786	0,786	0,8930	0,8930	3,4565
1980	1981	»	1,000	1,000	0,8930	0,8930	4,3495
1981	1982	»	0,700	0,850	0,8500	0,8500	5,1995
1982	1983	»	0,455	0,455	0,5775	0,5775	5,7770
1983	1984	»	0,944	0,944	0,6995	0,6995	6,4765
1984	1985	»	0,800	0,800	0,8720	0,8720	7,3485
1985	1986	»	0,435	0,435	0,6175	0,6175	7,9660
1986	1987	»	0,333	0,333	0,3840	0,3840	8,3500
1987	1988	»	0,700	0,700	0,5165	0,5165	8,8665
1988	1989	»	0,666	0,666	0,6830	0,6830	9,5495
1989	1990	»	0,692	0,692	0,6790	0,6790	10,2285
1990	1991	»	0,666	0,666	0,6830	0,6830	10,9115
1991	1992	»	0,444	0,444	0,5550	0,5550	11,4665
1992	1993	»	0,833	0,833	0,6385	0,6385	12,1050
1993	1994	»	0,500	0,500	0,6665	0,6665	12,7715
1994	1995	»	0,733	0,733	0,6165	0,6165	13,3880
1995	1996	»	0,846	0,846	0,7895	0,7895	14,1778
1996	1997	»	0,727	0,727	0,7865	0,7865	14,9640

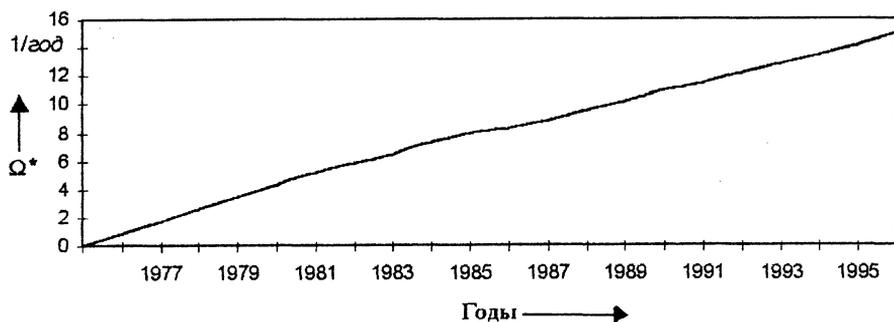


Рис. 1. Статистическая  $\Omega^*(t)$  функция распределения

Тогда, используя критерий Колмогорова для проверки анализируемой выборки по аналогии с [2], определим расхождение между экспериментальной  $P^*(t)$  и теоретической  $P(t)$  функциями распределения  $D$

$$D = |P^*(t) - P(t)|_{\max} \quad (7)$$

Теоретическая функция с учетом частоты отказов на этапе освоения по статистическим данным имеет вид

$$P(t) = 1 - e^{-lt} \quad (8)$$

Статистическая  $\Omega^*(t)$ , экспериментальная  $P^*(t)$  и теоретическая  $P(t)$  функции распределения изображены на рис. 1, 2, а результаты расчетов сведены в табл. 3.

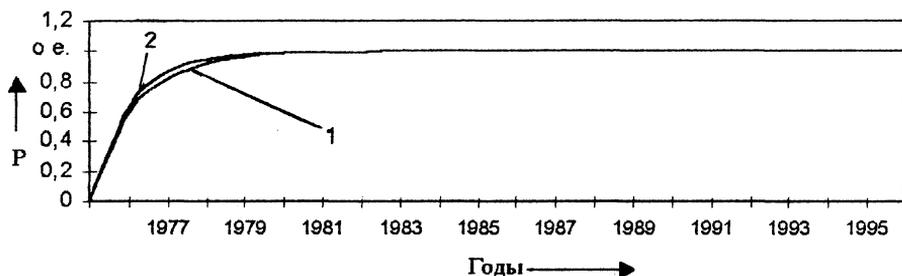


Рис. 2. 1 —  $P^*(t)$ ; 2 —  $P(t)$

Определим максимальное расхождение  $D = |P^*(t) - P(t)|$  из табл. 3, равное 0,0632. Соответственно мера расхождения составит

$$a = D\sqrt{n} = 0,0632\sqrt{6} = 0,1548,$$

где  $n$  — число испытаний, равное количеству состояний энергоблоков на первом интервале наблюдений.

По табл. А3 приложения [3] найдем значение функции  $k(a)$  и сравним его с мерой расхождения:  $k(a) < 0,000001$ , т. е.  $k(a) < a$ . Из этого следует, что гипотеза об экспоненциальном законе распределения является верной.

## Экспериментальная и теоретическая функции распределения

$t_{i-1}$	$\Omega^*(t)$	$P^*(t)$	$P(t)$	$D$
—	0	0	0	0
1976	0,9090	0,5970	0,6321	0,0632
1977	1,7135	0,8198	0,8647	0,0449
1978	2,5635	0,9230	0,9502	0,0327
1979	3,4565	0,9685	0,9817	0,0132
1980	4,3495	0,9870	0,9933	0,0063
1981	5,1995	0,9945	0,9975	0,0030
1982	5,7770	0,9969	0,9975	0,0006
1983	6,4765	0,9985	0,9991	0,0002
1984	7,3485	0,9994	0,9996	»
1985	7,9660	0,9996	0,9998	»
1986	8,3500	0,9997	0,9999	»
1987	8,8665	0,9998	»	0,0001
1988	9,5495	0,9999	»	0
1989	10,2285	»	»	»
1990	10,9115	»	»	»
1991	11,4665	»	»	»
1992	12,1050	»	»	»
1993	12,7715	»	»	»
1994	13,3880	»	»	»
1995	14,1778	»	»	»
1996	14,9640	»	1,0000	»

Особый интерес специалистов проявляется в определении степени влияния на надежность работы энергоблока его структурных частей, в частности котла и турбины. В табл. 4 приведены ретроспективные статистические данные о работе четырех моноблоков с турбинами К-300-240 за 20-летний период с разбивкой его на 5-летние интервалы. Учитывались вынужденные остановки котлов и турбин, повлекшие отключение энергоблоков от сети.

Таблица 4

## Среднегодовые данные о работе структурных частей моноблоков 300 МВт

Номер энергоблока, структурная часть	Годы, показатели												
	1976—1980			1981—1985			1986—1990			1991—1995			
	$T_{в, ч}$	$T_{о, ч}$	$\omega, 1/\text{год}$	$T_{в, ч}$	$T_{о, ч}$	$\omega, 1/\text{год}$	$T_{в, ч}$	$T_{о, ч}$	$\omega, 1/\text{год}$	$T_{в, ч}$	$T_{о, ч}$	$\omega, 1/\text{год}$	
5	Турбина	128	37047	0,4	11,4	18659	0,6	0	37669	0	52,2	11302	0,6
	Котел	32,5	4116	1,4	20,5	4664	2,6	19,7	7534	1	19,6	11302	0,8
6	Турбина	157	37433	0,2	4	12466	0,6	1,6	19037	0,4	10	35496	0,6
	Котел	33,3	6239	1,2	37,3	5342	1,4	16,5	9518	0,8	20,6	11832	1
7	Турбина	4,2	12429	0,6	61,5	38762	0,2	0	37218	0	0	36277	0
	Котел	7	12429	0,6	17,3	2981	2,8	17,1	4652	1,6	5,4	18138	1,8
8	Турбина	44,3	9220	1,6	45,3	38581	0,4	0,25	36914	0,2	24,3	34133	0,2
	Котел	13	9220	0,4	17	7716	0,8	16,4	7383	0,8	22,8	4876	2

С использованием данных табл. 4, учитывая взаимозависимость событий, определены вероятности состояния отказа турбины  $P(T)$ , котла  $P(K)$  и энергоблока в целом  $P(\text{ЭБ})$  по выражению

$$P(\text{ЭБ}) = P(K) + P(T) - P(K) P(T). \quad (9)$$

Вероятность состояния отказа определялась по формуле

$$P = \omega \frac{T_{\text{в}}}{8760}, \quad (10)$$

вероятность безотказной работы  $R$  – из выражения

$$R = 1 - P. \quad (11)$$

Средний коэффициент готовности турбины, котла и энергоблока находился из выражения

$$K_{\text{гот}} = \frac{T_{\text{o}}}{T_{\text{o}} + T_{\text{в}}}, \quad (12)$$

где  $T_{\text{o}}$  – наработка на отказ, ч;

$T_{\text{в}}$  – среднее время восстановления работоспособности, ч.

Результаты указанных расчетов сведены в табл. 5, 6.

Сравнивая результаты, приведенные в табл. 5, 6, отметим, что показатель надежности  $K_{\text{гот}}$ , рассчитанный в условиях определенности ( $P = 0; 1$ ), имеет более низкое значение, нежели вероятность безотказной работы  $R$ , полученная в условиях неопределенности ( $0 < P < 1$ ). Среднестатистическое расхождение при этом составляет 0,00314375. Приняв во внимание нормативное значение надежности для энергооборудования электростанций Республики Беларусь и стран СНГ  $H = 0,9960$ , можно сделать вывод, что детерминированная оценка состояния энергооборудования с использованием  $K_{\text{гот}}$  критерия  $n - 1$  несколько меньше нормативной (среднестатистический  $K_{\text{гот}}^{\text{ЭБ}} = 0,992775$ ). Вероятностная оценка надежности тех же энергоблоков (среднестатистическая  $R_{\text{ЭБ}} = 0,99591875$ ) практически равна нормативной.

В заключение отметим, что при создании нормативной технической документации по оценке надежности действующего и проектируемого энергооборудования следует более широко использовать современные вероятностные методы определения надежности, обладающие высокой точностью. В то же время достаточно глубокий анализ работы действующего энергооборудования можно производить с использованием ретроспективных данных. Это мнение автора согласуется с выводами работы [4], авторы которой проанализировали области применения детерминированных и вероятностных методов в электроэнергетике стран СНГ и за рубежом.

Таблица 5

## Вероятностная оценка состояния энергоблоков 300 МВт и их структурных частей

Номер энергоблока, структурная часть		Годы, показатели											
		Вероятность состояния отказа структурных частей, $P(K)$ и $P(T)$				Вероятность состояния отказа энергоблоков, $P(ЭБ)$				Вероятность безотказной работы энергоблоков, $R(ЭБ)$			
		1976–1980	1981–1985	1986–1990	1991–1995	1976–1980	1981–1985	1986–1990	1991–1995	1976–1980	1981–1985	1986–1990	1991–1995
5	Турбина	0,0058	0,0008	0	0,0036	0,0010	0,0069	0,0022	0,0054	0,9990	0,9931	0,9978	0,9946
	Котел	0,0052	0,0061	0,0022	0,0018								
6	Турбина	0,0036	0,0014	0,0007	0,0007	0,0082	0,0074	0,0022	0,0031	0,9918	0,9926	0,9931	0,9969
	Котел	0,0046	0,0060	0,0015	0,0024								
7	Турбина	0,0003	0,0014	0	0	0,0008	0,0069	0,0031	0,0011	0,9992	0,9931	0,9969	0,9989
	Котел	0,0005	0,0055	0,0031	0,0011								
8	Турбина	0,0081	0,0020	0,0005	0,0005	0,0110	0,0035	0,0020	0,0057	0,9989	0,9965	0,9980	0,9943
	Котел	0,0030	0,0015	0,0015	0,0052								

Среднегодовые данные о работе структурных частей моноблоков 300 МВт

Номер энерго- блока, структур- ная часть		Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$							
		1976—1980 гг.		1981—1985 гг.		1986—1990 гг.		1991—1995 гг.	
5	Турбина	0,9965	0,9887	0,9994	0,9950	1	0,9974	0,9954	0,9937
	Котел	0,9922		0,9956		0,9974		0,9983	
6	Турбина	0,9958	0,9430	0,9997	0,9927	0,9999	0,9982	0,9997	0,9980
	Котел	0,9470		0,9930		0,9983		0,9983	
7	Турбина	0,9997	0,9991	0,9984	0,9926	1	0,9963	1	0,9970
	Котел	0,9994		0,9942		0,9963		0,9970	
8	Турбина	0,9952	0,9938	0,9988	0,9966	0,9999	0,9977	0,9993	0,9946
	Котел	0,9986		0,9978		0,9978		0,9953	

## ЛИТЕРАТУРА

1. З лепко В. Ф., Линкевич К. Р., Швецова Т. А. О надежности тепло- силового оборудования электростанций // Энергетик. — 1999. — № 11. — С. 21—22.
2. Г р у б и ц и н В. И. Надежность электрической части электростанций. — М.: Изд-во МЭИ, 1993. — 112 с.
3. Г не денко Б. В. Курс теории вероятностей. — М.: Наука, 1988. — 393 с.
4. К о в а л е в Г. Ф., Лебедев Л. М. Области использования и пределы применимости критерия N-I при формировании структуры и выборе параметров элементов ЭЭС. — Иркутск, 1999. — 69 с. (Препринт /Ин-т. систем энерг. Сиб. отд. РАН; №6).

Представлена кафедрой  
тепловых электрических  
станций

Поступила 7.02.2000

УДК 518:517.392

## ОБ ОДНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ РЕШЕНИЯ ТРЕТЬЕЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИЛОГАРИФМОВ

Кандидаты физ.-мат. наук, доценты ЛАСЫЙ П. Г., МЕЛЕШКО И. Н.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Рассмотрим следующую краевую задачу для уравнения Лапласа в круге радиуса  $R > 0$ :

$$\Delta u = (ru'_r)'_r + \frac{1}{r} u''_{\varphi\varphi} = 0; \quad (1)$$

$$u'_r(R, \varphi) + \alpha u(R, \varphi) = f(\varphi), \quad (2)$$