

# ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Докт. техн наук, проф. КАРНИЦКИЙ Н. Б., инж. ШИЧКО С. Н.

Белорусский национальный технический университет,  
Минская ТЭЦ-5

Одним из наиболее часто используемых показателей надежности является коэффициент готовности  $K_{\text{гот}}(t)$ . Согласно [1],  $K_{\text{гот}}(t)$  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. В практике анализа риска отказа традиционно оперируют не с вероятностями, а со средними интенсивностями нежелательных событий за определенное время [2, 3]. Если рассматривать отказ как стационарный пуассоновский поток событий, то связь между вероятностью события и его интенсивностью запишется как

$$P_A(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \text{ при } \lambda t < 0,01 \quad P_A(t) = \lambda t. \quad (1)$$

В [4] представлена методика расчета основных показателей надежности энергоблока. В качестве примера предложена упрощенная технологическая схема гипотетического энергоблока, изображенная на рис. 1 [4], данные по наработке на отказ  $T_0$  и среднему времени восстановления  $T_b$  представлены в табл. 1.

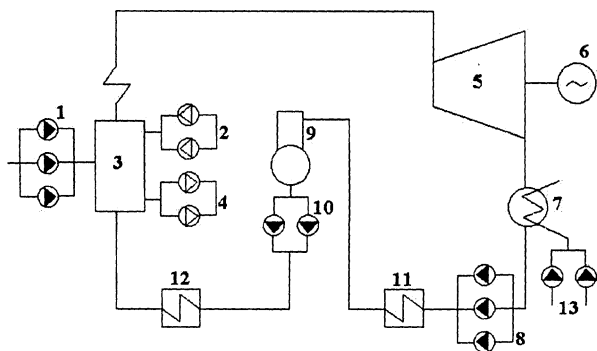


Рис. 1. Схема гипотетического энергоблока

Таблица 1

$T_b$  и  $T_0$  для элементов гипотетического энергоблока

| Компонента                      | $T_b$ | $T_0$ | Число компонент | Мощность компоненты, % |
|---------------------------------|-------|-------|-----------------|------------------------|
| Топливный насос                 | 35    | 12000 | 3               | 100                    |
| Дутьевой вентилятор             | 45    | 30500 | 2               | 60                     |
| Котел                           | 70    | 2100  | 1               | 100                    |
| Дымосос                         | 30    | 23000 | 2               | 60                     |
| Паровая турбина                 | 60    | 4300  | 1               | 100                    |
| Электродвигатель                | 55    | 15000 | 1               | 100                    |
| Конденсатор                     | 25    | 14000 | 1               | 100                    |
| Конденсатный насос              | 15    | 40000 | 3               | 70                     |
| Деаэратор                       | 25    | 45000 | 1               | 100                    |
| Питательный насос               | 45    | 1100  | 2               | 100                    |
| Подогреватели низкого давления  | 10    | 14000 | 1               | 100                    |
| Подогреватели высокого давления | 25    | 6500  | 1               | 100                    |
| Циркуляционный насос            | 30    | 55000 | 2               | 100                    |

Вначале строится компонентная схема энергоблока и определяются показатели средней наработки на отказ и среднего времени восстановления для каждой компоненты за определенный период. Каждая компонента обозначена на рис. 2 прямоугольником, внутри которого обозначена его мощность (производительность) в процентах, причем последовательность положения компонент на схеме может не соответствовать реальному положению в технологической схеме. Компонента может находиться или в состоянии готовности, или в состоянии отказа.

Далее производится агрегатирование схемы, заключающееся в разбиении компонентной схемы на подсистемы. Затем подсистемы объе-

диняются в группы подсистем и строится дерево отказов. Метод дерева отказов включает: определение подсистем и границ подсистем, нежелательного события в подсистеме или состоянии отказа подсистемы; дезагрегирование до компонентного уровня отказов, приводящих к указанному нежелательному событию или состоянию отказа подсистемы. Используемый метод дерева отказов позволяет сократить количество компонент, сохраняя при этом высокую точность [4].

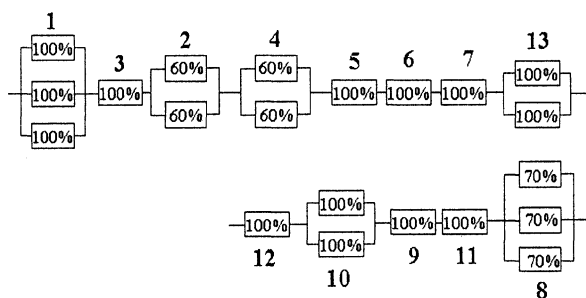


Рис. 2. Компонентная схема энергоблока

Для определения коэффициента готовности вначале вычисляется коэффициент неготовности схемы. Для двух элементов, соединенных параллельно:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 (T_{b1} + T_{b2}); \quad (2)$$

$$T = T_{b1} T_{b2} / (T_{b1} + T_{b2}). \quad (3)$$

Коэффициент неготовности

$$K_{\text{нег}} = \lambda_1 \lambda_2 T_{b1} T_{b2}. \quad (4)$$

Для трех и более параллельных элементов к определенным  $\lambda$  и  $T_b$  из выражений (2) и (3) добавляются показатели следующего элемента и производится последующий расчет аналогично выражениям (1) и (2).

При последовательном соединении элементов схемы

$$K_{\text{нег}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{bi}. \quad (5)$$

В конце расчета определяются дискретные мощности состояния энергоблока (в процентах по отношению к номинальной) и продолжительность каждого состояния.

Коэффициент готовности определяется по выражению

$$K_{\text{гот}} = T_{\text{гот}} / T, \quad (6)$$

где  $T_{\text{гот}}$  – время нахождения блока в состоянии готовности;  $T$  – расчетный период в 1 год.

Применение формул (2)...(5) в предлагаемой методике введено с целью упрощения расчетов и сохранения высокой степени точности. Однако при увеличении времени ремонтно-восстановительных работ точность расчета будет падать: очевидно, при больших значениях среднего времени восстановления агрегата значение коэффициента неготовности

$$K_{\text{нег}} = 1 - K_{\text{гот}} = T_b / (T_0 + T_b) \quad (7)$$

будет ниже, чем по формуле (4). Для двух компонент, соединенных параллельно:

$$K_{\text{нег}} = (1 - K_{\text{гот1}})(1 - K_{\text{гот2}}) = T_{b1} T_{b2} / (T_{01} + T_{b1})(T_{02} + T_{b2}). \quad (8)$$

Коэффициент готовности по описанной выше методике применительно к схеме (рис. 2) и данным (табл. 1) равен 0,8699.

Развитие средств автоматизации математических вычислений и программных продуктов позволяет быстро и эффективно производить весьма сложные и громоздкие вычисления, значительно расширить и углубить диапазон исследуемых задач. Применительно к энергетике это дает возможность моделировать сложные динамические системы (энергосистема, электростанция, энергоблок), а также решать оптимизационные технико-экономические задачи.

Для примера, рассмотренного выше, запишем данные в виде матриц и составим алгоритм расчета компонентной схемы энергоблока с применением программы MATHCAD [5]. Так как в табл. 1 заданы одинаковые данные  $T_0$  и  $T_b$  для агрегатов, соединенных параллельно, столбцы в матрицах  $A$  и  $B$  совпадают. В предложенном нами методе расчета для каждого агрегата можно использовать индивидуальные характеристики  $T_0$  и  $T_b$  для любого агрегата. В общем случае при расчете  $K_{\text{гот}}$  для блочной части будем считать, что для обеспечения работы блока в узлах с параллельными компонентами достаточно работы одной из параллельно соединенных компонент:

$$A = \begin{pmatrix} 2100 & 70 \\ 4300 & 60 \\ 15000 & 55 \\ 14000 & 25 \\ 45000 & 25 \\ 14000 & 10 \\ 6500 & 25 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 30500 & 45 & 30500 & 45 \\ 23000 & 30 & 2300 & 30 \\ 1100 & 45 & 1100 & 45 \\ 55000 & 30 & 55000 & 30 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 12000 & 35 & 12000 & 35 & 12000 & 35 \\ 40000 & 15 & 40000 & 15 & 40000 & 15 \end{pmatrix},$$

где  $A$  – матрица элементов без резервирования;  
 $B$  – то же, попарно параллельных между собой;  
 $C$  – матрица групп, состоящих из трех параллельных элементов;

$$S1 = \frac{1}{A^{(0)}} \cdot A^{(1)}; \quad S2 = \overline{(B^{(1)} \cdot B^{(3)})} \cdot \overline{\left(\frac{1}{B^{(0)}} \cdot \frac{1}{B^{(2)}}\right)},$$

где  $A^{(0)}$  – выделение первого столбца матрицы  $A$ ;  $A^{(1)}$  – выделение второго столбца матрицы  $A$ ;  
 $S1$  – результат скалярного умножения векторов  $1/A^{(0)}$  и  $A^{(1)}$ .

Аналогичный расчет проведен для матрицы  $B$ , где под знаком векторизации « $\rightarrow$ » произведено векторное умножение соответствующих столбцов:

$$C1 = \overline{\left(\frac{1}{C^{(0)}} \cdot \frac{1}{C^{(2)}}\right)} \cdot \overline{(C^{(1)} + C^{(3)})};$$

$$C2 = \overline{(C^{(1)} \cdot C^{(3)})} \cdot \overline{\left(\frac{1}{C^{(1)} + C^{(3)}}\right)}.$$

$$C = \begin{pmatrix} 122 & 35 & 1121 & 76 & 11 & 33 & 342 & 34 & 222 & 67 & 222 & 45 \\ 222 & 334 & 222 & 65 & 12 & 34 & 122 & 55 & 522 & 43 & 24 & 42 \\ 332 & 233 & 1121 & 45 & 12 & 56 & 3423 & 124 & 222 & 44 & 255 & 98 \\ 221 & 233 & 1211 & 344 & 12 & 44 & 223 & 234 & 322 & 23 & 1422 & 67 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $C$  – матрица, в четных столбцах которой записано время восстановления компоненты, а в нечетных – наработка на отказ.

Очевидно, что при больших значениях наработки на отказ не имеет смысла такое резервирование, так как коэффициент готовности будет стремиться к 1.

Столбцы  $C1$  и  $C2$  представляют собой промежуточные результаты, полученные согласно выражениям (1) и (2):

$$C3 = \text{augment}\left(\frac{1}{C^{(4)}}, C^{(5)}, C1, C2\right).$$

Здесь  $C3$  – матрица, объединяющая бок о бок столбцы, записанные под знаком скобок.

$$S3 = \overline{(C3^{(1)} \cdot C3^{(3)})} \cdot \overline{(C3^{(0)} \cdot C3^{(2)})}.$$

В итоге коэффициент готовности

$$K = 1 - S1 - S2 - S3,$$

а после вычислений  $K = 0,9405$ .

В [1] коэффициент готовности получен с учетом времени простоя в плановых ремонтах  $T_{пл} = 30$  сут. за расчетный период  $T = 365$  сут. Определим  $T_v$  для расчетного периода:

$$T = (1 - K_{\text{гот}})(T - T_{\text{пл}}); \quad (9)$$

$$K = \frac{T - T_v - T_{\text{пл}}}{T}. \quad (10)$$

Коэффициент готовности, определенный из выражения (6),  $K = 0,8632$ , что близко к коэффициенту, рассчитанному в [1], равному 0,8699 при тех же исходных данных.

Для большого числа параллельно соединенных элементов запишем программный блок, реализованный средствами MATHCAD. В качестве примера рассмотрим схему, состоящую из четырех групп, содержащую по шесть взаимно параллельных компонентов. Данные наработки на отказ и времени восстановления взяты произвольно:

$$i = 0 \dots \text{cols}(C) - 1;$$

$$C1^{(i)} := \begin{cases} \frac{1}{C^{(i)}} & \text{if } \frac{i}{2} - \text{trunc}\left(\frac{i}{2}\right) = 0; \\ C^{(i)} & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$C1 =$$

|   | 0                     | 1   | 2                     | 3   | 4     | 5  |
|---|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-------|----|
| 0 | $8.197 \cdot 10^{-3}$ | 35  | $8.921 \cdot 10^{-4}$ | 76  | 0.091 | 33 |
| 1 | $4.505 \cdot 10^{-3}$ | 334 | $4.505 \cdot 10^{-3}$ | 65  | 0.083 | 34 |
| 2 | $3.012 \cdot 10^{-3}$ | 233 | $8.921 \cdot 10^{-4}$ | 45  | 0.083 | 56 |
| 3 | $4.525 \cdot 10^{-3}$ | 233 | $8.258 \cdot 10^{-4}$ | 344 | 0.083 | 44 |

$$C1 =$$

|   | 6                     | 7   | 8                     | 9  | 10                    | 11 |
|---|-----------------------|-----|-----------------------|----|-----------------------|----|
| 0 | $2.924 \cdot 10^{-3}$ | 34  | $4.505 \cdot 10^{-3}$ | 67 | $4.505 \cdot 10^{-3}$ | 45 |
| 1 | $8.197 \cdot 10^{-3}$ | 55  | $1.916 \cdot 10^{-3}$ | 43 | 0.042                 | 42 |
| 2 | $2.921 \cdot 10^{-4}$ | 124 | $4.505 \cdot 10^{-3}$ | 44 | $3.922 \cdot 10^{-3}$ | 98 |
| 3 | $4.484 \cdot 10^{-3}$ | 234 | $3.106 \cdot 10^{-3}$ | 23 | $7.032 \cdot 10^{-4}$ | 67 |

где  $i$  – число столбцов матрицы  $C$ ;  $C1$  – матрица коэффициентов  $\lambda$  и  $T_b$ .

$$\begin{aligned}
 K(x) := & B \leftarrow \text{augment}(x^{(0)}, x^{(1)}); \\
 & \text{for } j \in 1 \dots \frac{\text{cols}(x)}{2} - 1; \\
 & \quad B1 \leftarrow \text{augment}[B, (x)^{(2j)}, (x)^{(1+2j)}]; \\
 & \quad B2 \leftarrow \overrightarrow{(B1^{(0)} \cdot B1^{(2)}) (B1^{(1)} + B1^{(3)})}; \\
 & \quad B3 \leftarrow \overrightarrow{\left( \frac{(B1^{(1)} \cdot B1^{(3)})}{(B1^{(1)} + B1^{(3)})} \right)}; \\
 & \quad B \leftarrow \text{augment}(B2, B3); \\
 & \quad D \leftarrow 1 - (B^{(0)} \cdot B^{(1)}),
 \end{aligned}$$

где  $K(x)$  – программный модуль для расчета коэффициента готовности в схеме с большим количеством параллельных элементов. Численное значение  $K(x) = K(C)$  для данного примера равно 0,914.

## ВЫВОД

Применение предложенного метода расчета готовности с использованием программы MATHCAD позволяет оперативно проводить анализ влияния компонент на общую готовность. Метод обладает наглядностью и высокой точностью вычислений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжкин А. А., Слюсарь Б. Н., Шучев К. Г. Основы теории надежности: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2002. – 182 с.
2. Риск аварии как оценка нежелательных потерь / А. И. Гражданкин, Д. В. Дегтярев, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды Международной научной школы МА БР-2002. – (Санкт-Петербург, 2–5 июля 2002 г.). – СПб: Изд-во «Бизнес-Пресса». – 2002. – С. 515–518.
3. Основные показатели риска аварии в терминах теории вероятностей / А. И. Гражданкин, Д. В. Дегтярев, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 7. – С. 35–39.
4. Борушко А. П., Борушко Г. А., Карницкий Н. Б. Методические рекомендации по оценке показателей безотказности, ремонтпригодности и готовности энергетических блоков. – М.: СПО ОРГРЭС, 1991. – 48 с.
5. Дьяконов В. Mathcad 2000: Учеб. курс. – СПб.: Питер, 2001. – 591 с.