

УДК 621.029

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК. Сборник научных трудов № 6 кафедры АСУ. Под общей редакцией доктора технических наук, профессора В.А.Острейковского 1990. - 0.Изд.ИАТЭ, 94с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ

При выполнении вероятностных анализов безопасности атомных станций широко используются структурно-логические модели надежности систем безопасности в виде деревьев отказов, которые отражают связь между отказами элементов (первичными событиями) и отказом системы (вершинным событием). Системы безопасности имеют многоканальную структуру, как правило, с полностью функционально независимыми каналами. Опыт зарубежных исследований показывает [1], что предположение о полной независимости отказов резервируемых каналов (элементов), не имеющих функциональных связей, приводит к значительной, вплоть до нескольких порядков, недооценке вероятности невыполнения системой заданных функций. Это объясняется наличием неявных зависимостей, вызывающих отказы по общей причине функционально независимых каналов системы безопасности. Обязательность анализа таких отказов закреплена в новом основном отечественном нормативном документе по безопасности АС [2] .

Отказы по общей причине составляют один из классов зависимых событий и обусловлены широким спектром повторяющихся ошибок человека на какой-либо стадии жизненного цикла резервируемых объектов (проектировании, изготовлении, монтаже, эксплуатации) или общих для объектов экстремальных воздействий из окружающей среды. В общем случае как возникновение таких ошибок или воздействий, так и их влияние на резервируемые объекты имеет вероятностный характер.

Недостатком зарубежных методик анализа отказов по общей причине является игнорирование многообразия механизмов их возникновения и проявления [1,3,4] . Как правило, на этапе качественного анализа системы выявляется подверженность групп элементов воздействию хотя бы одной значимой общей причине и затем для количественного анализа используется одна и та же параметрическая модель. Такой подход вносит значительную неопределенность в конечный результат, так как не позволяет детально учесть степень подверженности элементов различным воздействиям в различных условиях до ввода в эксплуатацию, в режиме ожидания или в период аварии, отсутствие или наличие контроля таких отказов и его вид (периодический или непрерывный). В ряде случаев целесообразно и детальное моделирование самой общей причины.

В институте "Атомэнергoproject" разработано "Руководство по выполнению вероятностных анализов безопасности АС при проектировании", в котором представлена методика анализе различных видов отказов по общей причине с учетом их специфики. Методика предусматривает выделение трех классов групп элементов, подверженных возможности отказов по общей причине. Признаками принадлежности групп элементов к тому или иному классу являются следующие:

1 класс - общность конструкции резервируемых элементов;

2 класс - размещение резервируемых элементов различных каналов в одном помещении;

3 класс - одинаковые для различных элементов процедуры технического обслуживания и/или проверок, которые сопровождаются или могут сопровождаться изменением состояния элемента или его составных частей.

Элементы различных каналов систем безопасности могут образовывать группы, имеющие признаки принадлежности к нескольким классам.

К первому классу отнесены элементы, у которых отказы по общей причине вызываются наличием дефектов изготовления и монтажа. Это приводит к снижению несущей способности элементов, что не всегда выявляется при пусконаладочных или периодических испытаниях системы, так как нагрузки при испытаниях зачастую не адекватны некоторым аварийным. Очевидно, что отказы такого типа являются неконтролируемыми при нормальной эксплуатации и независимыми от времени безаварийной эксплуатации системы. Для их моделирования удобно использовать так называемую модель базового параметра, т.е. непосредственные статистические оценки вероятностей (или интенсивностей) отказов по общей причине определенных комбинаций резервируемых элементов q_i . В этом случае вероятность отказа Q_i равно i элементов по общей причине определяется по формуле:

$$Q_i = C_n^i q_i \quad 2, \dots, n, \quad (1)$$

где C_n^i - число сочетаний по i из n ,
 а верхняя оценка средней вероятности отказа на требование Q_2, Q_3 и Q_4 системы из 2-х, 3-х и 4-х элементов соответственно, по любым причинам на интервале времени T (при условии, что отсутствует восстановление отказавших элементов) имеет вид:

$$Q_2 = q_2 + \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt;$$

$$Q_3 = q_3 + 3q_2 q_2 + 3q_2 \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt;$$

$$Q_4 = q_4 + 6q_2 q_2 + 12 q_3 q_3 + 12 q_3 q_2 \quad (2)$$

$$+ 24q_2 q_2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt + 4q_3 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt +$$

$$+ 6q_2 \frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T q^4(t) dt$$

где q_2, q_3, q_4 - вероятность отказа по общей причине определенных двух, трех и четырех элементов, соответственно;

$q(t)$ - вероятность независимого отказа элемента.

В уравнениях (2) учтено, что на один элемент могут воздействовать одновременно не более двух общих причин, а также опущены члены более малых порядков (произведения минимальных сечений).

При моделировании элементов 2-го и 3-го класса, зависимые отказы которых обусловлены различными общими причинами, возникающими в период их эксплуатации, определяются вероятностные характеристики этих причин и реакции на них резервируемых элементов. Если существует множество k общих причин $\{A_i\}$, воздействующих на группу из n резервируемых элементов, которому соответствует множество отказов этих элементов $\{S_j\}$, то вероятность отказа

Q_n этой группы элементов по общей причине определяется формулой:

$$Q_n = \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\prod_{j=1}^n P(S_j | A_i) \right] \cdot P(A_i) \right\} \quad (3)$$

где $P(A_i)$ - вероятность события A_i ,

$P(S_j | A_i)$ - условная вероятность события S_j .

Частным случаем уравнения (3) является параметрическая биномиальная модель, специфика применения которой для элементов 2-го и 3-го классов рассмотрена ниже.

Элементы второго класса подвержены отказам по общей причине из-за экстремальных внешних воздействий окружающей среды. Эти внешние воздействия делятся на два подкласса по характеру их проявления для рассматриваемых элементов: ударные воздействия, приводящие к идентификации неработоспособного состояния элементов вскоре после своего возникновения (например, пожар), и воздействия, вызывающие скрытые отказы элементов (например, повышенная влажность, температура, вибрация).

Ударные воздействия вызывают явные (быстро выявляемые) отказы, которые не имеют скрытой фазы. Поэтому независимое совпадение моментов возникновения таких воздействий и исходных событий аварии крайне маловероятно. Интерес представляют экстремальные воздействия, которые могут быть следствием исходного события аварии:

пожары вследствие коротких замыканий при заливе электрооборудования после возникновения исходного события аварии;

затопления (запаривания) помещений при разрывах трубопроводов или срабатывании паросбросных устройств;

образование летящих предметов или реактивных струй вследствие разрушения оборудования.

Для моделирования таких ударных воздействий целесообразно использовать биномиальную модель:

$$\lambda_i = \begin{matrix} \nu \cdot p^i (1-p)^{n-i} & i=1, & n-1 \\ \nu \cdot p^n + \omega & i=n \end{matrix} \quad (4)$$

где n — число элементов, подверженных ударному воздействию;

ν — условная вероятность возникновения ударного воздействия после начала исходного события аварии;

p — условная вероятность отказа элемента при работе защитных средств (например, системы пожаротушения);

ω — вероятность отказа защитных средств.

Внешние воздействия, приводящие к множественным скрытым отказам оборудования, связаны с нарушением нормальных эксплуатационных условий расположенного в одном помещении резервируемого оборудования. Такое оборудование систем безопасности эксплуатируется в режиме ожидания с периодическими проверками работоспособности, поэтому эти отказы являются периодически контролируруемыми. Ряд значительных нарушений нормальной эксплуатации приводит к полному

отказу всех элементов (так называемые летальные воздействия), при возникновении остальных нарушений элементы отказывают независимо с условной вероятностью, отличной от единицы (нелетальные воздействия).

Биномиальная модель для таких воздействий имеет вид:

$$\lambda_i = \begin{cases} \nu \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} & i=1, \dots, n-1; \\ \nu \cdot p^n + \omega & i=n, \end{cases} \quad (5)$$

где n - число резервируемых элементов, расположенных в помещении;

λ_i - интенсивность скрытого отказа по общей причине одновременно ровно i определенных элементов, I/ч;

ν - интенсивность нелетальных воздействий, I/ч;

ω - интенсивность летальных воздействий, I/ч;

p - условная вероятность отказа элемента при нелетальном воздействии.

В этом случае средняя вероятность отказа Q_n системы из n элементов по любым причинам на интервале времени T (учитывая первый член разложения экспоненциального распределения, если

$\lambda_i t \ll 1$ и $\nu t p^{n-i} (1-p)^i \ll 1$) определяется по формуле:

$$Q_n = \frac{1}{T} \int_0^T [(\lambda t)^n + (\nu p^n + \omega)t + \sum_{i=1}^{n-1} C_n^i (\lambda t)^i \nu t p^{n-i} (1-p)^i] dt, \quad (6)$$

где λ - интенсивность независимых скрытых отказов, I/ч;

C_n^i - число сочетаний из i по n .

Множественные отказы элементов третьего класса связаны с повторяющимися ошибками эксплуатационного персонала при операциях технического обслуживания или проверок работоспособности резервируемого оборудования. Возможны два типа источников отказов по общей причине вследствие ошибок персонала:

периодические обходы и/или техническое обслуживание резервируемых элементов, проводимое одной группой лиц в течение одной смены, при которых требуются или могут потребоваться активные действия персонала, влияющие на работоспособность оборудования, например, регулировка расхода, корректировка уровня;

периодические проверки работоспособности или техническое обслуживание резервируемых элементов, проводимое одной группой лиц

в течение одной смены, на период которых требуется отключение оборудования.

Отказы по общей причине обоих типов возникают у оборудования в режиме ожидания и являются периодически контролируемыми. Их моделирование также проводится с помощью биномиальной модели:

$$\lambda_i = \begin{cases} \nu \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}; & i = 1, \dots, n-1; \\ \nu \cdot (p^n + \omega) & \end{cases} \quad (7)$$

где n - число обслуживаемых испытываемых резервируемых элементов;

λ_i - интенсивность отказа вследствие таких ошибок одновременно ровно i определенных элементов, 1/ч;

ν - частота осмотров (операций технического обслуживания) оборудования или испытаний с отключением оборудования, 1/ч;

p - условная вероятность неправильного выполнения персоналом исполнительской части функции контроля;

ω - условная вероятность неправильного выполнения персоналом подфункции принятия решения функции контроля.

Средняя вероятность отказа на требование системы из n элементов определяется по формуле (6), где вместо ω подставляется $\nu \cdot \omega$.

Приведенные параметрические модели позволяют оценивать интенсивности (вероятности) отказов по общей причине, что дает возможность их моделирования явным образом на дереве отказов или неявно путем расширения набора соответствующих минимальных сечений.

Литература

1. Токмачев Г.В. Учет зависимых отказов оборудования в вероятностных анализах безопасности АЭС. "Атомная техника за рубежом", 1990, № 3. С.10-16.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. (СПБ-88). Москва, 1990.
3. Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies. EPRI NP-5613. NUREG/CR - 4780, USA, 1988.
4. Guidelines for conducting probabilistic safety assessment of nuclear power plants. Safety series report 5983d/0207d, IAEA, 1989.