

УДК 681.5

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

В. Г. Курбанов,

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

И. Л. Тарасова,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Предложена экспертная система, которая позволяет прогнозировать аварийные ситуации в энергетических установках большой единичной мощности на основе логико-вероятностного моделирования.

Ключевые слова — логико-вероятностная модель, логико-вероятностная переменная, вероятность безотказной работы, база данных, база знаний, машина логического вывода.

Введение

В настоящее время операторы на ГЭС при оценке функционирования оборудования и возможных неисправностей руководствуются СТО 17330282.27.140.001-2006 «Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций». Каких-либо автоматизированных систем оценки возможных аварийных ситуаций путем анализа текущего состояния гидроагрегатов и показаний приборов не предусмотрено. Однако создание систем, способных подсказывать операторам возможные развития аварийных ситуаций и их опасность, а также возможные действия для сохранения живучести весьма актуально. При этом необходимо решить проблемы быстрого анализа большого объема количественной и качественной информации в условиях неполной определенности. Решение этих проблем возможно путем создания экспертных систем, содержащих блоки логико-вероятностного моделирования развития и анализа аварийных ситуаций в гидроэнергетических машинных агрегатах большой единичной мощности.

Процесс построения адекватной логико-вероятностной модели некоторого технического объекта или системы может быть сведен к решению задачи поиска аппроксимирующего образа

I_a , в каком-то смысле наиболее близком к идеальному I образу этого объекта [1]. Решение этой задачи можно свести к поиску наилучшего бинарного отношения g_o , которое является элементом или подмножеством из множества G ($g_o \subseteq G$) и отвечает соотношению $I_a g_o I$ при выполнении ограничений $I_a q_i U_i$ и $I q_i U_i$ ($q_i \subseteq Q$, $i = 1, 2, \dots, m$), где G и Q — некоторые фиксированные компактные множества, а U_i — заданные априори модели или изображения ограничений.

При этом можно использовать методы, основанные на представлении логических функций как упорядоченных множеств и комбинаторных (не символьных) приемах их преобразования или такие, когда для упорядочивания множеств строится декартово произведение, элементы которого лексикографически упорядочены, и нет необходимости записывать явно все его члены, а достаточно знать, как вычислить любой из них. Тогда благодаря арифметическим свойствам получаемых систем логических уравнений, которые они проявляют при их представлении в виде алгебраических структур по модулю 2, т. е. в алгебре Жегалкина, оказывается возможным сведение логических задач к «арифметическим» или подобным арифметическим. Это в общем случае позволяет представлять логические системы как линейные структуры [2], уравнения которых не содержат конъюнктивных элементов, а для ана-

лиза и синтеза их структурных свойств использовать математический аппарат векторно-матричной алгебры.

Структура экспертной системы

Структура экспертной системы логико-вероятностной модели представлена на рис. 1.

База данных *БД* содержит сведения об оборудовании и связанных с ним контролируемых параметрах, а также априорные вероятности возможных аварийных и предаварийных событий. Некоторые данные заносятся в модель оператором перед началом сеанса моделирования посредством человеко-машинного интерфейса *ЧМИ*, например, априорные вероятности возможных аварийных и предаварийных событий для каждого блока. Другие данные поступают посредством приборного интерфейса *ПИ*, например, сведения о текущих значениях контролируемых параметров. Некоторые данные заносятся в процессе моделирования, например, текущее значение показателя связи аварийного события с анализируемым *i*-м объектом по *j*-му контролируемому параметру с индикатором отклонения *k*. Фрагмент *БД* показан в виде табл. 1.

Кроме этого, *БД* содержит сведения о действиях оператора при наступлении аварийного события $x(i, j, k)$ для *i*-го объекта по *j*-му контролируемому параметру с индикатором степени отклонения *k* контролируемого параметра от допуска, на-

пример, при наступлении аварийного события $x(1, 1, 1)$ для блока *i* = 1 по контролируемому параметру *j* = 1 с индикатором отклонения *k* = 1 хранится следующая рекомендация оператору ГЭС $y(1, 1, 1)$: «Установить причину высокого уровня биения вала и устранить ее при проведении профилактических работ».

Фазификатор Φ анализирует степень несоответствия текущих значений контролируемых параметров допустимым и присваивает им ту или иную лингвистическую переменную, которая затем переводится в логическую, имеющую значение 0, если ее нет, и 1, если она наблюдается. Логические переменные, имеющие значение 1, заносятся в *БД*.

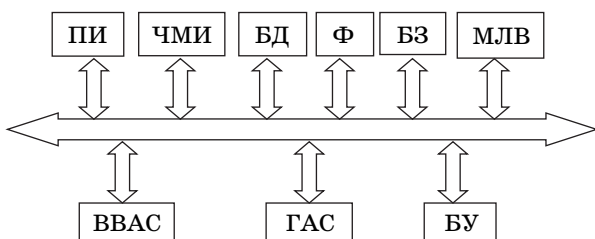
Пример правил, реализуемых в фазификаторе для получения логико-вероятностных переменных:

- если текущее значение амплитуды вибрации вала превышает допуск не более чем на 10 %, то $x(1, 1, 3)$ — «высокий уровень»;
- если текущее значение амплитуды вибрации вала превышает допуск более чем на 10 %, то $x(1, 1, 4)$ — «очень высокий уровень».

База знаний *БЗ* содержит продукционные правила следующего вида:

- если $x(i, j, k)$ с вероятностью $P\{x(i, j, k) = 1\}$, и $x(n, m, k)$ с вероятностью $P\{x(n, m, k) = 1\}$, и $x(p, q, k)$ с вероятностью $P\{x(p, q, k) = 1\}$, и т. д., то $y(i, j, k)$ с вероятностью $P\{y = 1\}$.

Например, если частота биения вала $x(1, 5, 2)$ значительно ниже с вероятностью $P = 0,6$, и амплитуда биения вала $x(1, 6, 2)$ высокая с вероятностью $P = 0,8$, и частота вибрации крышки турбины $x(1, 7, 1)$ значительно понижается с вероятностью $P = 0,8$, и наличие масла на поверхностях деталей и оборудования и в крышке гидротурбины $x(5, 4, 3)$ значительное с вероятностью $P = 0,8$, то «установить причину значительного понижения частоты биения вала и устранить во время профилактических работ» $y(1, 5, 2)$ с вероятностью $P = 0,3$.



■ Рис. 1. Структура экспертной системы

■ Таблица 1

Обозначение события	Аварийные события							Связанные события				
	$\alpha_0 \cdot 10^{-7}$	$t(i, j, k)$	$b(i, j, k)$	λ	$\alpha(i, j, k) \cdot 10^{-7}$	$P(i, j, k, \lambda)$	$\psi(k, 0)$	Обозначение события	β	φ	q	$\psi(k, q)$
$x(1, 1, 2)$	1,48	4756	0	0	1,48	0	1	$x(7,75,2)$	5,15	0	2	0,16667
								$x(7,76,2)$			2	0,16667
								$x(7,77,2)$			1	0,5
								$x(7,79,2)$			2	0,16667
$x(1, 1, 1)$	1,48	4756	0	0	1,48	0	0,83	$x(7,75,1)$	5,15	0	2	0,33333
								$x(7,76,1)$			1	0,66667
								$x(7,77,1)$			1	0,66667
								$x(7,79,1)$			1	0,66667
$x(1, 1, 3)$	1,48	4756	0	0	1,48	0	1	$x(7,75,3)$	5,15	0	2	0,33333
								$x(7,76,3)$			1	0,66667
								$x(7,77,3)$			1	0,66667
								$x(7,79,3)$			2	0,33333

Машина логического вывода *МЛВ* подставляет в правила БЗ из БД логические переменные $x(i, j, k)$, имеющие значения 1, и получает соответствующие им $y(i, j, k)$.

Правила вычисления вероятностей $P\{y = 1\}$ изложены в работах [3, 4] и помещены в блок вычислитель вероятностей аварийных событий *ВВАС*.

База знаний формируется оператором до начала сеанса моделирования либо может быть универсальной — содержать все возможные сочетания событий « $x(i, j, k)$ » и « $y(i, j, k)$ » и заполняться при создании модели.

В режиме контроля *ВВАС* вычисляет значения вероятности $P_o(t_m(i, j, k))$ тех событий $x(i, j, k)$, для которых заданы базой данных текущее время эксплуатации $t_m(i, j, k)$, время наработки на отказ (t_o) и соответствующая вероятность безотказной работы $P_{\text{бo}}$, и записывает их в БД. В соответствии с «Методикой оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций» по ГОСТ 5616–89 величины $t_o = 27\,000$ ч и $P_{\text{бo}} = 0,996$. Очевидно, что $P_o(t_o) = 1 - P_{\text{бo}}(t_o)$ и что при $t_m(i, j, k) = 0$ $P_{\text{бo}}(t_m(i, j, k)) = 1$, а при увеличении времени эксплуатации вероятность $P_{\text{бo}}(t_m(i, j, k))$ убывает по экспоненциальному закону:

$$P_{\text{бo}}(t_m(i, j, k)) = -\exp(-\alpha_0 t_m(i, j, k)), \quad (1)$$

где коэффициент α_0 вычисляется в блоке *ВВАС* по уравнению (1) при заданных начальных t_0 и $P_{\text{бo}}$.

Если в процессе эксплуатации оборудования для каких-либо $x(i, j, 2)$ или $x(i, j, 4)$ *ВВАС* вычислит $P(i, j, 2) > 0,5$ или $P(i, j, 4) > 0,5$, то он выдает оператору через ЧМИ сообщение «*i*-е оборудование находится под угрозой аварии по *j*-му параметру».

В режиме моделирования или имитации аварийных событий *ВВАС* на каждом шаге эволюции системы пересчитывает по уравнению (1) вероятности событий $P_o(t_m(i, j, k))$ при наступлении той или иной аварийной ситуации в соответствии с алгоритмом, изложенным ниже, заменяя $t_m(i, j, k)$ на машинное (моделируемое) время $t(i, j, k) = t(i, j, k) + vd$, где v — текущая глубина моделирования, а d — шаг эволюции, и α_0 на

$$\alpha(i, j, k) = \alpha_0 \exp(\beta \varphi(i, j, k) b(i, j, k)). \quad (2)$$

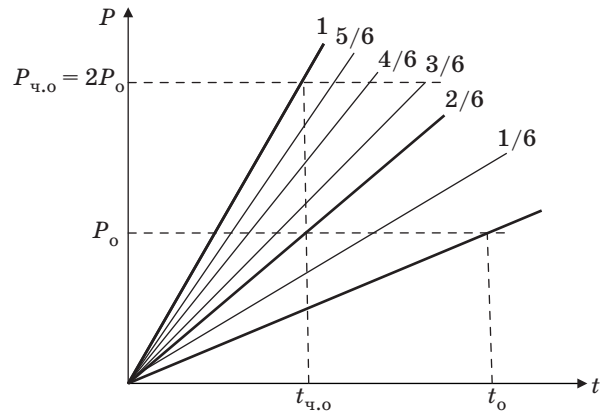
Параметры β , $\varphi(i, j, k)$ и $b(i, j, k)$ определяют при частичном отказе оборудования ($\lambda = 0,5$) в соответствии с изложенным ниже алгоритмом и рис. 2. При этом

$$\beta = \ln(\alpha_{\text{ч.o}} / \alpha_0), \quad (3)$$

где

$$\alpha_{\text{ч.o}} = -(1 / t(i, j, k)) \ln(1 - 2P_o). \quad (4)$$

Кроме того, *ВВАС* вычисляет вероятности решений $y(i, j, k)$ для соответствующих $x(i, j, k) = 1$.



■ Рис. 2. Графики изменения вероятности отказа при эволюции системы

Генератор аварийных событий *ГАС* используется в экспертной системе в режиме моделирования и содержит генератор случайных чисел от 0 до 1 с равномерным распределением; нормализатор вероятностей, пересчитывающий вероятности событий $P(t_m)$ в пропорциональные им нормированные значения $P^H(t_m)$ таким образом, чтобы сумма вероятностей всех событий была равна единице; определитель типа ситуации, который выявляет, что:

— произошло событие $x(1, 1, 1)$, если генератор случайных чисел выдает число, лежащее в промежутке от 0 до нормированной вероятности события $x(1, 1, 1)$;

— произошло событие $x(1, 1, 2)$, если генератор случайных чисел выдает число, лежащее в промежутке от значения нормированной вероятности события $x(1, 1, 1)$ до значения суммы нормированных значений вероятностей событий $x(1, 1, 1)$ и $x(1, 1, 2)$;

— произошло событие $x(1, 2, 1)$, если генератор случайных чисел выдает число, лежащее в промежутке от значения суммы нормированных значений вероятностей событий $x(1, 1, 1)$ и $x(1, 1, 2)$ до значения суммы нормированных значений вероятностей событий $x(1, 1, 1)$, $x(1, 1, 2)$ и $x(1, 2, 1)$, и т. д.

Человеко-машинный интерфейс обеспечивает ввод в экспертную систему данных от оператора и вывод заключений в зависимости от режима работы, либо ранжированные по вероятностям все возможные предаварийные и аварийные ситуации по блокам, либо рекомендации оператору при наступлении той или иной ситуации.

Приборный интерфейс обеспечивает ввод в модель данных от приборов, измеряющих текущее значение контролируемых параметров.

Блок управления *БУ* обеспечивает координацию работы всех блоков модели в двух режимах: контроль, или «Наблюдение» событий, и «Моде-

лирование» аварийных и предаварийных ситуаций. В режиме «Наблюдение» аварийное событие $x(i, j, k)$ определяется с помощью фазификатора в результате анализа контролируемых параметров.

Алгоритм моделирования

1. Задание начальных условий:

— для всех i, j, k $\alpha = \alpha_0, t_0 = 27\ 000, P_0 = 0,004, t = 0, P_{60} = 0,996, P = 0, P^H = 0, \varphi = 0, b = 0, q = 0, \lambda = 0$, где $i \in [1, N], j \in [1, N^*], k \in [1, 4]$;

— $\psi(1,0) = \psi(3,0) = 1; \psi(2,0) = \psi(4,0) = 5/6; \psi(1,1) = \psi(3,1) = 4/6; \psi(2,1) = \psi(4,1) = 3/6; \psi(1,2) = \psi(3,2) = 2/6; \psi(2,2) = \psi(4,2) = 1/6;$

— начальные значения счетчиков: $l(0) = 0, S^*(0) = 0, S(0) = 0, v = 0;$

— $d = 1000$ — шаг прогнозирования.

Значения d, n, m, ψ, k, V (заранее заданное время эволюции), q, λ задаются экспертами — специалистами по оборудованию.

Значения N, N^* задаются оператором ГЭС. Кроме того, оператор ГЭС может изменять значения n, m, ψ, t_0, P_0 для всех i, j, k .

Начальные значения t, β для всех i, j, k берутся из БД (таблицы) или задаются экспертами — специалистами по оборудованию.

Величины $t_0 = 27\ 000$ ч и $P_{60} = 0,996$ взяты из СТО 17330282.27.140.001-2006.

2. Вычисление исходного показателя надежности:

$$\alpha_0 = -1/t_0(\ln P_{60}).$$

3. Вычисление времени работы i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

$$t(i, j, k) = t(i, j, k) + vd.$$

4. Вычисление текущего показателя α надежности i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

$$\alpha(i, j, k) = \alpha_0 \exp(\beta \varphi(i, j, k) b(i, j, k)).$$

5. Вычисление текущей вероятности P аварийного события x для i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

— если $\varphi(i, j, k) = 1$, то $P(i, j, k) = 1 - \exp(-\alpha(i, j, k) t(i, j, k));$

— если $\varphi(i, j, k) = 0$ и $k = 2$ или $k = 4$, то $P(i, j, k) = 1 - \exp(-\alpha(i, j, k) t(i, j, k));$

— если $\varphi(i, j, k) = 0$ и $k = 1$ или $k = 3$, то $P(i, j, k) = 2(1 - \exp(-\alpha(i, j, k) t(i, j, k))).$

6. Если $P(i, j, 2) > 0,5$ или $P(i, j, 4) > 0,5$, то для данного $x(i, j, 2)$ или $x(i, j, 4)$ выдается сообщение «система под угрозой аварии».

7. Нормирование вероятности P^H аварийного события i -го объекта по j -му контролируемому

му параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

$$P^H(i, j, k) = P(i, j, k) / \sum_{i, j, k} P(i, j, k).$$

8. Вычисление значения w и вероятности $P^H(w)$ аварийного события i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k с перебором всех индексов i, j, k :

$$w = [i, j, k] \text{ и } P^H(w) = P^H(i, j, k).$$

9. Вычисление начальной $S(w)$ и конечной $S^*(w)$ границы интервала нормированной вероятности $P^H(w)$ аварийного события:

$$S(w) = \sum_w P(w), S^*(w) = \sum_{w+1} P(w+1) \text{ при } P^H(0) = 0.$$

10. Вычисление числа l наступления аварийного события x для всех i, j, k .

10.1. Для этого используется генератор случайных чисел с равномерным законом распределения в пределах от 0 до 1 с числом запусков, например, $h = 1000$.

Для каждого случайного числа r ищется интервал при следующих условиях: $r \geq S(w)$ и $r \leq S^*(w)$. Для этого интервала увеличиваем соответственно $l(w) = l(w) + 1$.

10.2. Определяем максимальное значение $l(w)$ и по нему находим наступившее событие x для i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k . Для этого $x(i, j, k) = 1, q = 0$ и

1) если $k = 2$ или $k = 4$, то $\lambda = 1$, при этом оборудование заменяется или производится его капитальный ремонт, после чего текущее время для этого оборудования (для всех k) обнуляется, $t = 0$, и устанавливается $\varphi = 0$ для этих i, j, k ;

2) если $k = 1$ или $k = 3$, то $\lambda = 0,5$, оборудование не заменяется и не производится его капитальный ремонт, поэтому текущее время для этого оборудования не обнуляется и устанавливается $\varphi = 1$.

Вычисляется значение $\alpha_{ч.о}$ и β для этих i, j, k : $\alpha_{ч.о} = -(1 / t(i, j, k)) \ln(1 - 2P_0); \beta = \ln(\alpha_{ч.о} / \alpha_0).$

10.3. Если $x(i, j, k) = 1, \lambda = 0,5, q = 0$, то:

$$b(i, j, 1) = b(i, j, 3) = \psi(1,0) = \psi(3,0) = 1;$$

$$b(i, j, 2) = b(i, j, 4) = \psi(2,0) = \psi(4,0) = 5/6.$$

10.4. Для наступившего аварийного события $x(i, j, k)$ определяем по БД остальные связанные с ним события и соответствующие им $\psi(k, q)$.

10.5. Для найденных событий $\varphi = 1$ и $b(i, j, k) = \psi(k, q)$.

10.6. Для несвязанных событий $\varphi = 0$.

10.7. Все полученные значения $t(i, j, k), P(i, j, k), b(i, j, k), \alpha(i, j, k), \beta, \lambda, \varphi$ помещаются в БД взамен исходных данных.

■ Таблица 2

Объект i		Контролируемые параметры j		Граничные значения k				Рекомендации	
№	Наименование	№	Наименование	1	2	3	4	$k = 1$ или $k = 3$	$k = 2$ или $k = 4$
1	Рабочие колеса поворотных гидротурбин	1	Мощность турбины	Меньше нормы	Значительно меньше нормы	Выше нормы	Значительно выше нормы	«Установить причину недобора мощности и устранить во время профилактических работ»	«Установить причину перебора мощности и устранить во время профилактических работ»
		2	Открытие направляющего аппарата	Немного не полностью закрыт	Значительно не полностью закрыт	Немного не полностью открыт	Значительно не полностью открыт	«Установить причину неполного закрытия направляющего аппарата и устранить ее во время профилактических работ»	«Установить причину неполного открытия направляющего аппарата и устранить ее во время профилактических работ»
		3	Напор (разность высот верхнего и нижнего бьефов)	Немного ниже номинального	Намного ниже номинального	Немного выше номинального	Намного выше номинального	«Принять меры по уменьшению расхода (сброса) воды»	«Принять меры по сбросу излишков воды»

10.8. Если аварийное событие наступило, т. е. $x(i, j, k) = 1$, то его значение, т. е. 1, передается в БЗ.

10.9. МЛВ анализирует правила БЗ, определяет соответствующее заключение $y(i, j, k) = 1$ и выдает на монитор оператора лингвистические сообщения и рекомендации, выбираемые из БД.

11. $v = v + 1$ и возвращение к шагу 2.

12. Если $v > V$, то остановка процесса эволюции.

Предложенный алгоритм реализован в виде программного продукта. Программный продукт написан на языке C# и скомпилирован в среде visual studio 2010 Professional.

База данных сформирована в среде Excel 2003 в виде таблицы, значения которой импортируются в программный продукт и экспортируются из программного продукта. При заполнении БД использовалась информация, полученная путем анализа таблицы, заполненной в соответствии с СТО 17330282.27.140.001-2006. Ее фрагмент приведен в табл. 2.

Заключение

Разработанная логико-вероятностная модель развития и анализа аварийных ситуаций позволяет моделировать и прогнозировать аварийные ситуации для большинства гидроэнергетических агрегатов большой единичной мощности с учетом влияния основных технических эксплуатационных показателей, вводимых операторами в БД моделей перед началом сеанса работы, и изменения контролируемых параметров. При этом учитывается «Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростан-

ций» и влияние основных технических эксплуатационных показателей в соответствии с требованиями СТО 17330282.27.140.001-2006.

Достоверность прогноза и адекватность модели составляют от 70 до 85 %, зависят от точности задаваемых исходных параметров и могут быть повышены при коррекции модели по результатам апробации на характерных примерах.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 16.515.12.5002.

Литература

1. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности // Информационно-управляющие системы. 2008. Ч. 1. № 5. С. 10–14; Ч. 2. № 6. С. 22–25.
2. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г. Метод приведения систем логических уравнений к форме линейных последовательностных машин // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7. № 4. С. 37–41.
3. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 336 с.
4. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г., Кучмин А. Ю. Об одном методе вычисления вероятностей логических функций // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 2–7.