

УДК 621.039.56

Идентификация событий для ядерных энергетических установок на основе сетевых моделей и статистических методов

С.А. Качур, Е.Н. Давиденко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 30.08.2022 г.; после доработки 01.09.2022 г.

Аннотация

Рассмотрено повышение безопасности ЯЭУ за счет идентификации аварийных ситуаций на основе методов и моделей сетей Петри, нейронных сетей и прикладной статистики, что позволяет реализовать принцип разнообразия.

Ключевые слова: идентификация, реакторная установка, дерево событий, сети Петри, нейронные сети, дискриминантный анализ.

Identification of events for nuclear power plants based on network models and statistical methods

S.A. Kachur, E.N. Davidenko

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 30.08.2022 y.; received in final form 01.09.2022 y.

Abstract

The article considers improving the safety of nuclear power plants by identifying emergency situations based on methods and models of Petri nets, neural networks and applied statistics, which makes it possible to implement the principle of diversity.

Keywords: identification, reactor plant, event tree, Petri nets, neural networks, discriminant analysis.

Введение

Мировой опыт эксплуатации ЯЭУ показывает, что проблема безопасности – проблема потенциально возможных, маловероятных аварий по причине отказа технических систем и ошибок персонала. Предотвращение аварий является одним из главных принципов безопасности и обеспечивается, в первую очередь, высокой надежностью оборудования и систем нормальной эксплуатации и квалификацией персонала.

Существующие нормативные требования предполагают детерминированное рассмотрение вопросов безопасности в рамках концепции проектных аварий и принципа единичного отказа.

Детерминистский подход не дает единой комплексной оценки безопасности сложной системы, неполно учитывает всю совокупность аварий. Поэтому в настоящее время все более широкое развитие приобретает вероятностный метод анализа безопасности ЯЭУ [1-8].

Основой вероятностного подхода является системный анализ мыслимых сценариев аварий, представленных в виде «деревьев событий» [4, 5]. Вероятностная оценка безопасности применяется как при проектировании АЭС и ее систем, так и при эксплуатации. Ограничения в использовании вероятностных методов связаны с недостаточностью данных для проведения соответствующего анализа, а также знаний о потенци-

альной опасности отказов, имеющих общие причины, и о поведении эксплуатационного персонала для каждой аварийной ситуации (исходного события). Кроме этого, существует необходимость выявления отказов оборудования, приводящих к множественным или зависимым отказам или к снижению эффективности систем.

Исходя из опыта аварий последнего времени, можно сделать заключение, что только параллельный (без учета локальных взаимных связей) анализ ряда исходных событий и путей их развития не удовлетворяет требованиям обеспечения безопасности ЯЭУ. Как следствие этого – необходимость рассмотрения не множества независимых сценариев аварийных ситуаций, каждый из которых описывается «деревом событий», а единой сети этих сценариев, учитывающей реальную ситуацию и позволяющей прогнозировать ее развитие на базе текущих вероятностей отказа оборудования ЯЭУ. Для реализации такого подхода предлагается использовать математический аппарат сетей Петри [2], метод прикладной статистики, а именно дискриминатный анализ, и нейронные сети, которые позволят определить степень риска возникновения аварии с учетом случайных причинно-следственных связей различных сценариев. Наличие случайных связей обусловлено не только влиянием внешних случайных факторов, но и отсутствием априорной информации о поведении системы на всем множестве возможных состояний.

В соответствии с «Правилами ядерной безопасности реакторных установок ядерных станций» принципы независимости, разнообразия и резервирования являются фундаментальными принципами повышения надежности, согласно которым системы безопасности должны проектироваться так, чтобы влияние исходных событий, отказов, дефектов оборудования, ошибок персонала и отказов по общей причине, на работоспособность систем было минимальным.

Принцип разнообразия – принцип повышения надежности систем путем применения в разных системах (либо в пределах одной системы в разных каналах) различных средств и/или аналогичных средств, основанных на различных принципах действия для осуществления заданной функции.

При использовании этого принципа стремятся обеспечить повышение уровня безопасности, исключив методические или типовые недостатки, свойственные оборудованию и таким образом, расширив возможности предотвращения

нарушений.

Цель и задачи исследования

Цель работы – повышение безопасности ЯЭУ за счет идентификации аварийных ситуаций на основе методов и моделей сетей Петри, нейронных сетей и прикладной статистики.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать модель поведения системы, прогнозирующую аварийную ситуацию. Модель должна включать все исходные состояния, предусмотренные проектом, и отражать пути развития ситуаций, представленные в сценариях различных аварий. В этом контексте процесс смены состояний ЯЭУ является процессом переменной случайной структуры.

Модель аварийных ситуаций ЯЭУ на основе стохастических сетей Петри

Описание структуры процесса выполняется стохастической СП, которая отражает сценарии аварийных ситуаций S_k ($k = \overline{1, m}$). На рис. 1 приведен в виде «дерева событий» сценарий аварийной ситуации, рассмотренный в [5].

Маркированная стохастическая СП в совокупности с моделями элементов, сопоставленных переходам, и моделями сигналов, определяющих движение маркера, является моделью стохастического процесса переменной случайной структуры. При расчете вероятностей, сопоставленных переходам, будем использовать байесовский подход к статистическому оцениванию [8], предполагая, что для ситуации имеется две вероятностные модели: работоспособное состояние системы, неработоспособное состояние системы.

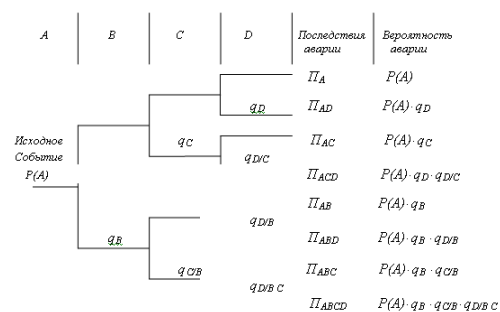


Рис. 1. Вид «дерева событий»: верхние ветви после разветвления соответствуют работоспособному состоянию системы, а нижние ветви – неработоспособному состоянию; q – вероятность отказа системы (B, C, D); $P(A)$ – вероятность исходного события

Приведем этапы построения модели ЯЭУ на основе стохастической сети Петри, рассматривая все сценарии развития аварийных ситуаций (исходных событий).

1. Определяем вероятность неработоспособного состояния блока D_j ($j = \overline{1, n}$) при наибольшем несоответствии распределения параметров теоретическому закону распределения

$$\alpha_j^- = 1 - \min_i p_{ji}. \quad (2)$$

2. Определяем вероятность неработоспособного состояния блока D_j ($j = \overline{1, n}$) при наименьшем несоответствии распределения параметров теоретическому закону распределения

$$\alpha_j^+ = 1 - \max_i p_{ji}. \quad (3)$$

3. Выполним построение дерева вероятностей для модели «неработоспособного состояния». Число уровней дерева вероятностей соответствует количеству блоков $n1$, число узлов дерева вероятностей — 2^{n1} . Устанавливаем вероятность исходного состояния θ_0 равную минимальной рассчитанной по проекту вероятности.

4. В соответствии со сценарием S_k определяем подмножество блоков $DD \subseteq D$ и последовательность их влияния на развитие аварийной ситуации. Для каждого узла уровня x ($x = \overline{1, n1}$) дерева вероятностей (рис.2), используя рекуррентную формулу (вероятность θ_x рассчитывается через вероятность θ_{x-1} , сопоставленную предшествующему узлу дерева), находим вероятность неработоспособного состояния при наличии наибольшего несоответствия распределения параметров блока $DD_x \equiv D_j$ ($DD_x = "-"$) и при наличии наименьшего несоответствия распределения параметров блока $DD_x \equiv D_j$ ($DD_x = "+"$)

$$\theta_x = \begin{cases} \frac{\alpha_x^- \theta_{x-1}}{(1 - \alpha_x^+) + (\alpha_x^- + \alpha_x^+ - 1) \theta_{x-1}}, & \text{если } DD_x = "-" \\ \frac{(1 - \alpha_x^-) \theta_{x-1}}{\alpha_x^+ + (\alpha_x^- + \alpha_x^+ - 1) \theta_{x-1}}, & \text{если } DD_x = "+" \end{cases} \quad (4)$$

5. Для каждого сценария аварийной ситуации S_k ($k = \overline{1, m}$) выполняем п.3-4.

6. Пересчитываем вероятности неработоспособного состояния блоков D_j ($j = \overline{1, n}$) по формуле

$$p_j = \max_{S_k} \max_{D_j} \theta_x \quad (5)$$

7. Сопоставляем в стохастической сети

Петри (рис.3) переходам $T_j^{(D)}$ ($j = \overline{1, n}$), соответствующим блокам ЯЭУ, вероятности p_j , рассчитанные по формуле (5). Переходам, соответствующим исходным состояниям $T_k^{(S)}$ ($k = \overline{1, m}$) и системе контроля параметров T_0 , сопоставляем вероятности равные 1. Дуга с выходной позиции $P_j^{(D)}$ перехода $T_j^{(D)}$ на вход перехода $T_i^{(D)}$ присутствует в том случае, если хотя бы в одном сценарии аварии существует непосредственная связь между блоками D_j и D_i .

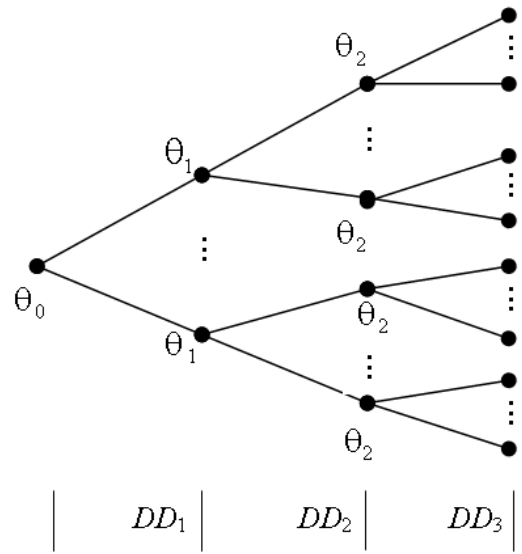


Рис. 2. Дерево вероятностей для сценария аварии S_k в случае неработоспособного состояния: верхние ветви после разветвления соответствуют "-", а нижние ветви — "+"

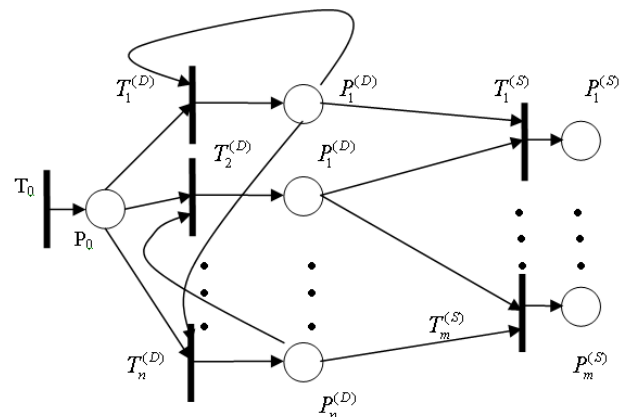


Рис. 3. Модель аварийных ситуаций ЯЭУ на основе стохастических СП.

Рассмотрим кратко классификацию на основе обучающей выборки с использованием дискриминантного анализа и нейронных сетей.

Формулировка задачи идентификации состояния объекта на основе дискриминантного анализа

Задача дискриминантного анализа может быть сформулирована следующим образом [8].

Предположим, рассматривается m обучающих выборок, описывающие m классов событий. Каждая из выборок включает наблюдения p параметров системы $\{x^{(1)}, \dots, x^{(p)}\}$. Таким образом, i -е событие описывается вектором параметров

$$X_i = (x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(p)}).$$

Данные о n состояниях, соответствующих каждому событию, т.е. значения параметров $\{x^{(1)}, \dots, x^{(p)}\}$ приведены в форме таблицы.

Таблица. Показатели состояния системы

i	Событие первое			Событие j -е			Событие m -е		
	$x_{1i}^{(1)}$...	$x_{1i}^{(p)}$	$x_{ji}^{(1)}$...	$x_{ji}^{(p)}$	$x_{mi}^{(1)}$...	$x_{mi}^{(p)}$
1	$x_{11}^{(1)}$		$x_{11}^{(p)}$				$x_{m1}^{(1)}$		$x_{m1}^{(p)}$
\vdots	\vdots	...	\vdots		...		\vdots	...	\vdots
n	$x_{1n}^{(1)}$		$x_{1n}^{(p)}$				$x_{mn}^{(1)}$		$x_{mn}^{(p)}$

Необходимо знать, к какому классу относится текущее событие в настоящий момент, если известны текущие значения параметров $\{x_0^{(1)}, \dots, x_0^{(p)}\}$ этого блока.

Идентификация события с использованием нейронных сетей

При решении задачи классификации наиболее часто используются нейронные сети встречного распространения. Нейронные сети встречного распространения (двунаправленные нейронные сети, в системе MATLAB именуемые Learning Vector Quantization или LVQ-network) состоящие из входного слоя нейронов и так называемых слоев нейронов Кохонена и Гроссберга, по своим характеристикам существенно превосходят возможности сетей с одним скрытым слоем нейронов.

Так, время их обучения за дачам распознавания и кластеризации более чем в сто раз меньше времени обучения аналогичным задачам сетей с обратным распространением. Это может

быть полезно в тех приложениях, где долгая обучающая процедура невозможна.

Сеть встречного распространения имеет два слоя с последовательными связями Первый слой – слой Кохонена, второй – слой Гроссберга. Каждый элемент входного сигнала подается на все нейроны слоя Кохонена. Каждый нейрон слоя Кохонена соединен со всеми нейронами слоя Гроссберга. Отличие сети встречного распространения от других многослойных сетей с последовательными связями состоит в операциях, выполняемых нейронами Кохонена и Гроссберга.

В режиме функционирования сети предъявляется входной сигнал X и формируется выходной сигнал Y . В режиме обучения на вход сети подается входной сигнал и веса корректируются, чтобы сеть выдавала требуемый выходной сигнал.

Предположим, поставлена следующая задача классификации: задан набор из 10 векторов, представленных в виде столбцов матрицы

$$P = \begin{bmatrix} -2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 3 & 2 \\ 1 & -1 & 2 & 1 & -1 & -2 & 1 & -1 & 3 & 2 \\ 1 & -1 & 2 & 1 & -1 & -2 & 1 & -2 & 3 & 2 \end{bmatrix}$$

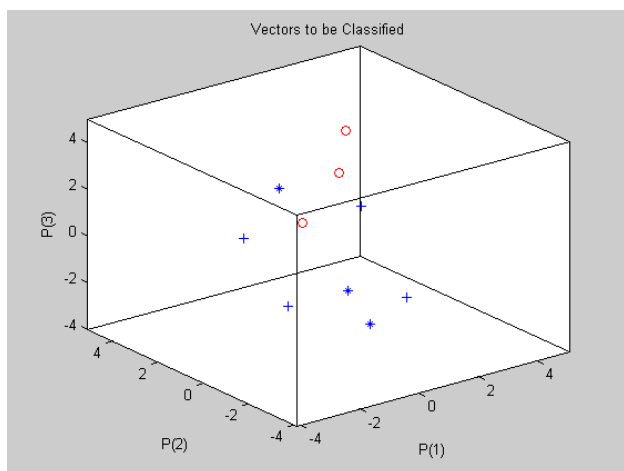
а также задан вектор-строка, указывающий принадлежность каждого вектора к одному из трех классов:

$$C = [1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 3 \ 3]$$

Требуется построить автоматический классификатор подобных векторов, используя приведенные данные как обучающую выборку. Определить номер события Y для значений параметров $X = [2; 2; 2]$.

Решение подобной задачи в программной среде MATLAB проведем с применением сети встречного распространения так, как это показано ниже.

```
P=[ -2 -2 0 0 0 0 2 2 3 2; 1 -1 2 1 -1 -2 1 -1 3 2;
1 -1 2 1 -1 -2 1 -2 3 2]
C=[ 1 1 2 3 2 2 1 1 3 3]
T=ind2vec(C)
plotpv(P,T)
net=newlvq(minmax(P), 4,[.4 .3 .3],0.1)
net.trainParam.epochs=150
net.trainParam.show=Inf
net=train(net,P,T)
X=[2; 2; 2]
Y=sim(net,P)
```



$$Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Таким образом, наблюдаемое событие относится к третьему классу.

Заключение

Предложены различные методы для идентификации состояния ЯЭУ, представленного деревом событий. Предложенные модели дают эквивалентное по сложности описание ситуации. Применение этих методов позволит реализовать принцип разнообразия для повышения надежности, за счет снижения влияния исходных событий, отказов, дефектов оборудования, ошибок персонала и отказов по общей причине на работоспособность систем.

Предложенный подход к идентификации аварийных режимов блоков ЯЭУ направлен на модификацию программной части СВРК. Он позволяет сократить время идентификации состояния при возникновении нарушений технологического процесса.

Список литературы

1. Шаповалова С.И., Шараевский Г.И. Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС // Проблемы программирования – 2008. – № 2–3. – С. 675–678.
2. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем / Д. Питерсон – М.: Мир, 1984. – 264 с.
3. Григорьев В.А., Колубин А.А., Логинов В.А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
4. Анохин А.Н., Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Системы поддержки оператора АЭС. – Обнинск: Институт атомной энергетики, 1988. – 92 с.
5. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б.

Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.

6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
7. Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С. Анализ состояния ГЦН ВВЭР1000 в процессе эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – №4. – С. 12–20.
8. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрии. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.

References

1. Shapovalova S.I., Sharoevskij G.I. Environment of design of neuron nets for the decision of tasks of diagnostics of equipment of APP. *Problemy programirovaniya*, 2008, № 2-3, pp. 675-678.
2. Piterson D. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem* [Theory of the Petri nets and systems simulation] Moscow, Mir, 1984, 264 p.
3. Grigor'ev V.A., Kolyubin A.A., Loginov V.A. *Elektronnye metody yaderno-fizicheskogo eksperimenta* [Electronic methods of nuclear-physical experiment]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 336 p.
4. Anohin A.N., Ostrejkovskij V.A., Sal'nikov N.L. *Sistema podderzhki operatora AES* [Systems of support of operator of APP]. Obninsk, Institut atomnoj energetiki, 1988, 92 p.
5. Bahmet'ev A.M., Samojlov O.B., Usynin G.B. *Bezopasnost' yadernyh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 279 p.
6. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs* [Neuron nets: complete course]. Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006, 1104 p.
7. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. Analysis of the state PCP PWR1000 in the process of exploitation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2016, №4, pp. 12-20.
8. Ajvazayn S.A., Mhitaryan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometrii* [Applied statistics and bases of mathematical economics]. Moscow, Yuniti, 1998, 1022 p.