

Оценка риска поражения электрическим током на основе логико-вероятностной теории безопасности

А.А. Нозик, канд. техн. наук, ген. директор, alexander_nozik@szma.com, **А.В. Струков**, канд. техн. наук (АО «СПИК СЗМА», Санкт-Петербург, Россия), **И.А. Можяева**, канд. техн. наук (ООО «НТЦ СЗМА», Санкт-Петербург, Россия)

Использование методов количественной оценки риска возникновения аварийной, опасной ситуации, широко применяемых при оценке надежности сложных структурных систем, допустимо и для решения задач безопасности. При этом точность расчетов на основе логико-вероятностного исчисления напрямую зависит от адекватности и достоверности построения математической модели. Рассмотрен пример анализа риска поражения электрическим током в сетях напряжением свыше 1000 В на основе логико-вероятностной теории безопасности. Установлена возможность анализа структурных показателей даже при отсутствии исходных данных о вероятностях инициирующих событий. Расчет значимости событий и их сочетаний выступает основанием для разработки организационно-технических мер по снижению риска поражения электрическим током. При количественной оценке этого риска в условиях неопределенности исходных данных и значительной размерности модели использованы программные средства структурно-логического моделирования.

Ключевые слова: логико-вероятностная теория безопасности, функция опасного состояния, сценарий развития аварии, риск поражения электрическим током, программный комплекс «АРБИТР».

Введение

На современном этапе развития теории безопасности накоплен определенный опыт, разработана концепция теории безопасности, определены основные направления ее практической реализации. Несомненный приоритет в этой области принадлежит разработке методов прогнозирования и количественной оценки риска возникновения аварийной, опасной ситуации. В процессе решения таких задач специалисты имеют дело со сложными проблемами формирования математических моделей процессов и явлений, для преодоления которых следует:

максимально конкретизировать суть опасного состояния, знать физические, химические и другие параметры оборудования, среды, процесса;

обоснованно ограничить объект исследования разумными рамками, определить пространственные границы и пределы дробления исследуемой системы на элементы;

применить строгую логику и дисциплину перебора всевозможных ситуаций при составлении сценария развития событий;

формализовать задачу перебора на удобном математическом языке (теория графов, алгебра логики) для ее программной реализации.

Одним из эффективных направлений в теории безопасности не только технических, но и организационно-технических систем можно признать логико-вероятностную теорию безопасности. Подтверждением этому может служить сформированная в 2002 г. международная научная школа «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных

системах», основатель и бессменный руководитель которой — проф. И.А. Рябинин.

Под логико-вероятностной теорией безопасности понимаются основные знания в области расчета риска возникновения аварий и катастроф сложных систем, базирующиеся на логическом представлении развития опасных состояний и математических методах вычисления истинности функций алгебры логики (ФАЛ) [1]. Логико-вероятностные методы (ЛВМ) исследования безопасности позволяют объективно выявлять наиболее опасные места, причины и инициирующие условия, позволяя специалистам концентрировать усилия на решении наиболее значимых задач. Следует особо отметить такие достоинства ЛВМ, как возможность провести анализ безопасности в отсутствие исходных данных (т.е. вероятностей инициирующих событий) только с использованием информации о структурных параметрах задачи, удобно формализовать и программно реализовать процедуру перебора состояний, математически строго определить важность не только любого инициирующего события, но и комбинаций событий.

В настоящее время опубликовано значительное число исследований с описанием практического применения ЛВМ в различных областях науки и промышленности, в том числе и для решения вопросов безопасности. Рассмотрим пример использования ЛВМ для анализа электробезопасности.

Использование ЛВМ на практике

В работе [2] сформулирована задача оценки риска поражения электрическим током в сети с изолированной нейтралью с помощью структурной схемы взаимосвязи событий, изображенной на

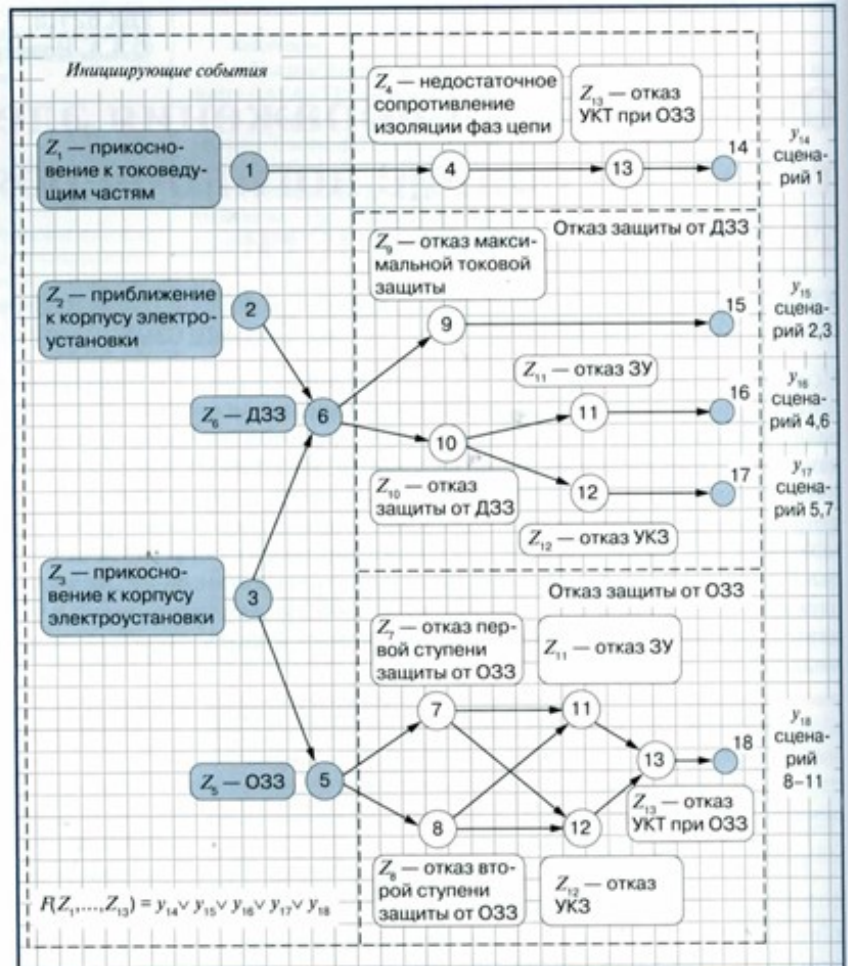
рисунке. В качестве инициирующих событий в ней названы: Z_1 — прикосновение к токоведущим частям; Z_2 — приближение к корпусу электроустановки; Z_3 — прикосновение к корпусу; Z_5 — однофазное замыкание на землю (ОЗЗ); Z_6 — двойное замыкание на землю (ДЗЗ) в различных точках сети.

Группа технических средств электробезопасности включала следующие инициирующие условия: Z_4 — недостаточно высокое сопротивление изоляции фаз сети; Z_7 , Z_8 — отказы соответственно первой и второй ступеней защиты от ОЗЗ; Z_9 , Z_{10} — отказы соответственно максимальной токовой защиты и блока защиты от ДЗЗ; Z_{11} , Z_{12} — отказы соответственно заземляющего устройства и устройства контроля параметров заземления; Z_{13} — отказ или отсутствие устройства компенсации токов ОЗЗ. Используя ЛВМ, авторы работы [2] составили логическую функцию опасного состояния (ФОС) поражения электрическим током в виде ФАЛ в дизъюнктивной нормальной форме, которая бывает монотонной либо повторной (по аргументам Z_3 , Z_{11} , Z_{12}) и содержит 11 конъюнкций $K_1 \div K_{11}$:

$$F(Z_1, \dots, Z_{13}) = \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \\ K_7 \\ K_8 \\ K_9 \\ K_{10} \\ K_{11} \end{matrix} = \begin{matrix} Z_1 Z_4 Z_{13} \\ Z_2 Z_6 Z_9 \\ Z_3 Z_6 Z_9 \\ Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{11} \\ Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{12} \\ Z_2 Z_6 Z_{10} Z_{11} \\ Z_2 Z_6 Z_{10} Z_{12} \\ Z_3 Z_5 Z_7 Z_{11} Z_{13} \\ Z_3 Z_5 Z_7 Z_{12} Z_{13} \\ Z_3 Z_5 Z_8 Z_{11} Z_{13} \\ Z_3 Z_5 Z_8 Z_{12} Z_{13} \end{matrix} \quad (1)$$

В ФОС (1) каждая строка матрицы (конъюнкция) — кратчайший путь или сценарий развития опасного состояния (аварии). Поражение электрическим током может произойти при реализации любого из 11 сценариев, поэтому они объединены дизъюнктивно.

Определение вероятности поражения электрическим током связано с преобразованием ФОС в неповторную логическую функцию, в которой логические переменные заменяются на вероятности их



▲ Фрагмент интерфейса ПК «АРБИТР»: схема функциональной целостности сценариев поражения электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В

истинности, а логические операции дизъюнкции и конъюнкции — соответствующими алгебраическими операциями сложения и умножения. Подобные преобразования в общем случае весьма трудоемки, что послужило причиной создания программных средств автоматизации ЛВМ [3].

В соответствии с ФОС (1) на рисунке изображены сценарии, приводящие к поражению электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В и представленные в виде схемы функциональной целостности (СФЦ) с помощью программного комплекса (ПК) «АРБИТР» [3, 4]. Эта схема — графическое средство для отображения свойств отдельных элементов, внутренней логики исследуемого процесса или системы, задания правил вычисления и анализа результатов моделирования. Программно реализованные в ПК «АРБИТР» алгоритмы ЛВМ позволяют не только рассчитать вероятность реализации заданного критерия (в рассматриваемом примере — вероятность поражения электрическим током), но и провести анализ значимости как отдельных событий, так и их сочетаний.

На рисунке номера сценариев развития опасного состояния соответствуют номерам конъюнкций ФОС (1). Задача состоит в определении вероятности поражения электрическим током Q_f . Логические ус-

ловия опасного состояния задаются в виде логической функции

$$F(Z_1, \dots, Z_{13}) = y_{14} \vee y_{15} \vee y_{16} \vee y_{17} \vee y_{18}$$

Логические функции $y_{14} \div y_{18}$ соответствуют критериям реализации соответствующих сценариев, которые на рисунке показаны фиктивными вершинами с номерами 14–18. Для решения задачи следует найти вероятности истинности логической функции $Q_F = \{F(Z_1, \dots, Z_{13}) = 1\}$, т.е. применить к ФОС (1) один из алгоритмов ЛВМ — алгоритм ортогонализации.

В работе [2] результатом приведения ФОС (1) к ортогональной дизъюнктивной нормальной форме стала логическая матрица, содержащая 99 строк. Применение современных алгоритмов ортогонализации [5] позволяет существенно сократить запись решения задачи:

$$F(Z_1, \dots, Z_{13}) = \frac{K_1}{K_1 K_2} \frac{K_1 K_2 K_3}{K_1 K_2 K_3 K_4} \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5}{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6} \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7}{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8} \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9}{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10}} \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11}}{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11}} \frac{Z_1 Z_4 Z_{13}}{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_6 Z_9} \frac{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_6 Z_9}{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_9} \frac{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_9}{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{11}} \frac{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{12}}{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{11}} \frac{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{12}}{Z_1 Z_4 Z_{13} Z_2 Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{11} Z_{12}} \frac{Z_1 Z_4 (\overline{Z_6} \vee Z_6 \overline{Z_9} \overline{Z_{10}}) Z_3 Z_5 Z_7 Z_{11} Z_{13}}{Z_1 Z_4 (\overline{Z_6} \vee Z_6 \overline{Z_9} \overline{Z_{10}}) \overline{Z_{11}} Z_3 Z_5 Z_7 Z_{12} Z_{13}} \frac{Z_1 Z_4 (\overline{Z_6} \vee Z_6 \overline{Z_9} \overline{Z_{10}}) \overline{Z_7} Z_3 Z_5 Z_8 Z_{11} Z_{13}}{Z_1 Z_4 (\overline{Z_6} \vee Z_6 \overline{Z_9} \overline{Z_{10}}) \overline{Z_7} \overline{Z_{11}} Z_3 Z_5 Z_8 Z_{12} Z_{13}}$$

Таким образом, скобочная конструкция матрицы (2) содержит 11 строк, в случае раскрытия скобок матрица будет содержать 33 строки. Фрагмент записи вероятностной функции для вычисления Q_F :

$$Q_F = \Pr\{y_{14} \vee y_{15} \vee y_{16} \vee y_{17} \vee y_{18} = 1\} = p_1 p_4 p_{13} + (1 - p_1 p_4 p_{13}) p_2 p_6 p_9 + (1 - p_1 p_4 p_{13}) q_3 p_2 p_6 p_9 + (1 - p_1 p_4 p_{13}) q_9 p_3 p_6 p_{10} p_{11} + \dots \quad (3)$$

где \Pr — знак вероятности; p_i — вероятность реализации i -го события, $p_i = \Pr\{Z_i = 1\}$; q_i — вероятность нереализации i -го опасного события, $q_i = 1 - p_i = \Pr\{\overline{Z_i} = 1\}$; $\overline{Z_i}$ — обозначение инверсной логической переменной.

Анализ значимости событий

Важным достоинством ЛВМ является их работоспособность даже в отсутствии исходных данных инициирующих событий (на рисунке функциональные вершины и соответствующие надписи отмечены серым фоном) и инициирующих условий. Рассмотрим это свойство ЛВМ на примере анализа значимости событий. Под значимостью будем понимать влияние отдельного события или нескольких событий на вероятность реализации конечного события. Анализ значимости сходен с анализом чувствительности, и его проведение дает полезную информацию для реализации технических или организационных мероприятий по снижению риска аварии. Существует множество алгоритмов оценки значимости событий и их сочетаний, в частности, алгоритм Бирнбаума [6], суть которого состоит в нахождении частной производной от вероятностной функции по i -му аргументу. Значимость i -го события ξ_i в рассматриваемом примере рассчитывается как частная производная от вероятности Q_F . В вычислительном плане для оценки значимости i -го события чаще используется формула

$$\xi_i = Q_F(Z_1, \dots, Z_i = 1, \dots, Z_n) - Q_F(Z_1, \dots, Z_i = 0, \dots, Z_n),$$

где n — число логических переменных.

Значимость события (элемента СФЦ) не зависит от вероятности реализации самого события, но зависит от места в структурной схеме (сценарий развития аварии) и вероятностных характеристик других событий. Если все события в сценарии равновероятны и вероятности их реализации равны 0,5, то возможна оценка именно структурной значимости события. Рассчитанная значимость называется весом элемента [6]: она физически показывает относительное число вхождений этого элемента в конъюнкции (пути развития опасного состояния или сценарии развития аварии) при полном переборе всех сценариев развития аварии.

В табл. 1 приведены результаты расчета веса событий функции (2) с помощью ПК «АРБИТР» (данные представлены в среде Microsoft Excel после сортировки весов).

Таким образом, даже не имея исходных данных по вероятностям реализации инициирующих событий и условий, можно сделать выводы о структурной

Таблица 1

Порядковый номер элемента	P_i	ξ_i
6	0,5	0,4116211
13	0,5	0,2514648
3	0,5	0,2163086
9	0,5	0,1918945
1	0,5	0,1635742
4	0,5	0,1635742
2	0,5	0,1503906
10	0,5	0,1098633
5	0,5	0,0659180
11	0,5	0,0629883
12	0,5	0,0629883
7	0,5	0,0219727
8	0,5	0,0219727

значимости элементов сценариев как для общей задачи определения вероятности поражения электрическим током [7], так и для отдельных сценариев. Как видно из табл. 1, наибольшим весом обладают элементы № 6, 13, 3, 9, 1 и 4.

При наличии исходных данных о вероятностях инициирующих событий и условий возможно применение нескольких алгоритмов оценки значимости элементов и их сочетаний [8]. В табл. 2 приведены исходные данные о вероятностях реализации инициирующих событий и условий p_i [7] и результаты расчетов с помощью ПК «АРБИТР» значимости событий функции (2) с использованием алгоритма Фусселя — Везели. Итоговые значения представлены в среде Microsoft Excel после сортировки показателей значимости.

Таблица 2

Порядковый номер инициирующего события	P_i	ξ_i
13	0,01000	0,998982881
1	0,38000	0,996623716
4	1,00000	0,996623716
3	1,00000	0,004826092
5	0,14600	0,003805104
11	0,20500	0,003468236
7	0,03700	0,003467567
2	1,00000	0,001021018
6	0,00070	0,001021018
12	0,05000	0,000845911
9	0,00374	0,000686621
8	0,00374	0,000350505
10	0,00747	0,000335652

Как видно из сравнения содержимого табл. 1 и 2, изменения в исходных данных о вероятностях событий существенно влияют на расположение событий в упорядоченном списке. Тем не менее событие 13 (отказ или отсутствие устройства компенсации токов ОЗЗ) по-прежнему имеет высокую значимость.

Кроме оценки веса и значимости отдельных элементов, алгоритмы автоматизированного ло-

гико-вероятностного моделирования позволяют оценивать значимость сочетаний событий. В частности, алгоритм Фусселя — Везели для совокупности событий [8] позволяет оценивать значимость любого сценария развития аварии.

В табл. 3 приведены исходные данные о вероятностях реализации сценариев развития аварии и результаты расчетов с помощью ПК «АРБИТР» их значимости с использованием алгоритма Фусселя — Везели для сочетаний событий (итоговые значения представлены в среде Microsoft Excel после сортировки показателей значимости). При этом использованы следующие термины и обозначения: номер конъюнкции — порядковый номер сценария развития аварии, приведенного в (1); $p_{\text{кон}}$ — вероятность реализации конъюнкции, т.е. сочетание событий, приводящих к поражению электрическим током; значимость конъюнкции — значимость сценария развития аварии; ЛФ — логическая функция в виде дизъюнктивной нормальной формы, описывающая условия поражения электрическим током.

Таблица 3

Порядковый номер конъюнкции	$P_{\text{кон}}$	$\xi_{\text{кон}}$	ЛФ
1	$3,80 \cdot 10^{-3}$	0,993988350	$Z_1 Z_4 Z_{13}$
8	$1,11 \cdot 10^{-5}$	0,002896717	$Z_3 Z_5 Z_7 Z_{11} Z_{13}$
11	$2,70 \cdot 10^{-6}$	0,000706516	$Z_3 Z_5 Z_7 Z_{12} Z_{13}$
2	$2,62 \cdot 10^{-6}$	0,000684806	$Z_3 Z_6 Z_9$
3	$2,62 \cdot 10^{-6}$	0,000684806	$Z_2 Z_6 Z_9$
9	$1,12 \cdot 10^{-6}$	0,000292803	$Z_3 Z_5 Z_8 Z_{11} Z_{13}$
4	$1,07 \cdot 10^{-6}$	0,000280395	$Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{11}$
5	$1,07 \cdot 10^{-6}$	0,000280395	$Z_2 Z_6 Z_{10} Z_{11}$
10	$2,73 \cdot 10^{-7}$	0,000071400	$Z_3 Z_5 Z_8 Z_{12} Z_{13}$
6	$2,61 \cdot 10^{-7}$	0,000068400	$Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{12}$
7	$2,61 \cdot 10^{-7}$	0,000068400	$Z_2 Z_6 Z_{10} Z_{12}$

Как видно из табл. 3, с точки зрения развития аварии наиболее вероятны сценарии № 1, 8, 11, 2, 3, ... Как отмечено в [7], наиболее существенный вклад в формирование опасности вносит первый (кратчайший) путь развития опасного состояния $K_1 = Z_1, Z_4, Z_{13}$.

Для проведения анализа риска поражения электрическим током при ДЗЗ необходимо задать логический критерий в виде $F_{\text{ДЗЗ}} = y_{15} \vee y_{16} \vee y_{17}$ и провести расчет вероятностных показателей только с учетом указанного инициирующего события без изменения СФЦ. В табл. 4 и 5 приведен фрагмент решения задачи по анализу риска поражения электрическим током при ДЗЗ (логический критерий $y_{15} + y_{16} + y_{17}$).

Данные в табл. 2–5 показывают, что наибольшую важность в поражении электрическим током согласно табл. 3 и ФОС (1) имеют инициирующие условия Z_6, Z_{13}, Z_3, Z_9 .

Для обоснования мер по предотвращению поражения электрическим током в логико-вероятност-

Таблица 4

Порядковый номер конъюнкции	$P_{кон}$	$\xi_{кон}$	ЛФ
1	$2,618000 \cdot 10^{-6}$	0,3312763809902190	$Z_3 Z_6 Z_9$
2	$2,618000 \cdot 10^{-6}$	0,3312763809902190	$Z_2 Z_6 Z_9$
3	$1,071945 \cdot 10^{-6}$	0,1356417342324520	$Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{11}$
4	$1,071945 \cdot 10^{-6}$	0,1356417342324520	$Z_2 Z_6 Z_{10} Z_{11}$
5	$0,261450 \cdot 10^{-6}$	0,0330833498127932	$Z_3 Z_6 Z_{10} Z_{12}$
6	$0,261450 \cdot 10^{-6}$	0,0330833498127932	$Z_2 Z_6 Z_{10} Z_{12}$

Таблица 5

Порядковый номер инициирующего события	P_i	ξ_i
2	1,00000	0,4999990121502410
3	1,00000	0,4999990121502410
6	0,00070	1,0000000000000000
9	0,00374	0,6625501278136590
10	0,00747	0,3374481053011230
11	0,20500	0,2712817607735270
12	0,02000	0,0661662026743108

ной теории безопасности разработана методика инверсного по отношению к задаче нахождения вероятности аварии решения, т.е. определения вероятности неопасного состояния исследуемой системы или процесса. Технология автоматизированного логико-вероятностного моделирования, реализованная в ПК «АРБИТР», позволяет решать подобные задачи без изменения расчетной СФЦ. В рассматриваемом примере эта методика означает замену логического критерия $F(Z_1, \dots, Z_{13}) = Y_{14} \vee Y_{15} \vee Y_{16} \vee Y_{17} \vee Y_{18}$ на инверсный критерий по правилу де Моргана, т.е. $F(Z_1, \dots, Z_{13}) = Y_{14} Y_{15} Y_{16} Y_{17} Y_{18}$.

Результатом решения инверсной задачи является оценка не только вероятности отсутствия аварии, но и, что более важно, значимости элементов схемы с точки зрения эффективности мер по уменьшению риска аварии. Одним из количественных показателей эффективности в логико-вероятностной теории безопасности рассматривается вклад (в рассматриваемом случае он положительный) в снижение вероятности возникновения опасного состояния. Положительный вклад (ПВ) i -го элемента определяют как произведение его значимости, рассчитанной по алгоритму Бирнбаума, на вероятность реализации i -го опасного события, т.е. $PВ = \xi_i P_i$.

В табл. 6 представлены результаты расчета ПВ некоторых элементов схемы. Из нее видно, что наибольший ПВ имеет элемент № 13. В случае предотвращения отказа устройств компенсации токов ОЗЗ ($P_{13} = 0$) вероятность не поражения электрическим током увеличивается на 0,003809. Приблизительно таким же ПВ обладает снижение вероятности прикосновения к токоведущим частям (элемент № 1).

Таблица 6

Порядковый номер элемента	Иницирующие события и условия	P_i	ξ_i	ПВ
13	Отказ устройства компенсации токов ОЗЗ	0,01000	0,380900	$3,809 \cdot 10^{-3}$
1	Прикосновение к токоведущим частям	0,38000	0,009980	$3,794 \cdot 10^{-3}$
6	ДЗЗ в различных точках сети	0,00070	0,005540	$3,880 \cdot 10^{-6}$
9	Отказы максимальной токовой защиты от ДЗЗ	0,00374	0,000696	$2,603 \cdot 10^{-6}$

Заключение

Теория безопасности технических систем при анализе риска аварии предполагает учет не только стандартных отказов оборудования, но и возможности нарушений правил эксплуатации и наличия разрушающих воздействий. При построении сценариев развития аварии следует учитывать сложный характер взаимодействия всех элементов сценария, их повторяемость, отсутствие или недостаточность исходных данных о вероятностях реализации. Логико-вероятностное моделирование позволяет с помощью оценки значимости событий или их сочетаний формировать требования по проведению организационно-технических мероприятий для снижения риска поражения электрическим током независимо от того, заданы вероятностные характеристики инициирующих событий и условий или нет. В приведенном примере на основе анализа структурных показателей модели поражения электротоком показано, что наиболее существенные результаты в деле повышения электробезопасности будут получены за счет совершенствования защитного заземления электроустановок и средств контроля его параметров.

Расчеты структурных показателей при сценарном моделировании показывают достаточную точность и чувствительность моделирования процесса электропоражения и возможность однозначной интерпретации полученных результатов в области разработки и реализации организационно-технических мероприятий по снижению риска возникновения опасности. Необходимость анализа значительного числа различных моделей развития аварий, сложности в получении исходных данных и стремление учесть как можно больше факторов, влияющих на безопасность, подразумевают широкое использование программных средств для построения ЛВМ.

Список литературы

1. Рябинин И.А. Надежность, живучесть, безопасность. Очерки разных лет. — Новочеркасск: Изд-во Южно-Российского гос. техн. ун-та, 2008. — 580 с.

2. Шуцкий В.И., Ситчихин Ю.В., Сидоров А.И. Характеристики звеньев структурной модели электропоражения при напряжении выше 1000 В// *Электричество*. — 1986. — № 5. — С. 65–67.

3. Можжаева И.А., Нозик А.А., Струков А.В. Автоматизированное проведение анализа рисков, последствий и критичности отказов с применением ПК «АРБИТР»// *Наука и безопасность: эл. журн.* — 2016. — № 2 (20). — С. 25–35. URL: http://www.наука-и-безопасность.рф/wp-content/uploads/20_june_2016.pdf (дата обращения: 02.08.2016).

4. Можжаев А.С. Аннотация программного средства «АРБИТР» (ПК АСМ СЗМА)// *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов»*. — М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2008. — № 2. — С. 105–116.

5. Ветлугин К.А., Струков А.В. Алгоритмы автоматизированного структурно-логического моделирования надежности и безопасности информационных и телекоммуникационных систем: учеб. пособие. — СПб: ФГБОУ ВО «Петербургский университет путей сообщения», 2016. — 47 с.

6. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та, 2007. — 276 с.

7. Рябинин И.А., Парфенов Ю.М., Цыпин О.Д. Логико-вероятностная теория безопасности технических систем// *Электричество*. — 1994. — № 7. — С. 17–23.

8. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1981. — 526 с.

alexander_nozik@szma.com

Материал поступил в редакцию 22 августа 2016 г.

«Bezопасnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2016, № 11, pp. 53–58.

Risk Assessment of Electric Shock on the Basis of logical and Probabilistic Theory of Safety

Information about the Author

A.A. Nozik¹, Candidate of Technical Sciences, General Director, alexander_nozik@szma.com

A.V. Strukov¹, Candidate of Technical Sciences

¹АО «СПИК СЗМА», Saint Petersburg, Russia

I.A. Mozhaeva, Candidate of Technical Sciences

ООО «NTC СЗМА», Saint Petersburg, Russia

Abstract

Practical implementation of quantitative risk assessment methods of emergency, dangerous situation occurrence depends on the adequacy and

accuracy of building of the mathematical model. Logical and probabilistic models widely used at assessment of reliability of the complicated-structural systems are applicable also for the resolution of safety tasks.

The Article describes an example of risk analysis of electric current shock in electrical grids with the voltage more than 1000 V on the basis of logical and probabilistic theory of safety. The possibility is established related to the analysis of structural indicators even in the absence of basic data on the probabilities of initiating events. Calculation of significance of the events and their combinations is recognized as the basis for the development of organizational and technical measures of the risk of electric shock reduction.

The authors conclude that at building of the accident scenarios development it is required to take into account the complicated nature of interaction of all the elements of scenarios, their frequency, lack or insufficiency of basic data on the probability of their implementation. Logical and probabilistic modeling allows by using the assessment of events significance or their combinations to form the requirements on conducting organizational and technical measures to reduce the risk of electric shock regardless of the fact whether the probabilistic characteristics of the initiating events and conditions are specified or not.

At quantitative risk assessment of accident occurrence under the conditions of basic data uncertainty and the significant dimension of the model it is proposed to use the software of scenario modeling, of electric shock in particular. Calculations show sufficient accuracy and sensitivity of this modeling with the possibility of an unambiguous interpretation of the obtained results.

Key words: logical-probabilistic theory of safety, function of dangerous condition, scenario of accident development, risk of electric shock, software complex «ARBITR».

References:

1. Ryabinin I.A. *Nadezhnost, zhivuchest, bezопасnost. Oчерki raznyh let* (Reliability, Survivability, Safety. Essays of Various Years). Novocheerkassk: Izd-vo Juzhno-Rossijskogo gos. tehn. un-ta, 2008. 580 p.

2. Shuckij V.I., Sitchikhin Ju.V., Sidorov A.I. *Jelektrichestvo = Electricity*. 1986. № 5. pp. 65–67.

3. Mozhaeva I.A., Nozik A.A., Strukov A.V. *Nauka i bezопасnost: jelectronnyj zhurnal = Science and Safety: Electronic Journal*. 2016. № 2 (20). pp. 25–35. Available at: http://www.наука-и-безопасность.рф/wp-content/uploads/20_june_2016.pdf (accessed: August 2, 2016).

4. Mozhaev A.S. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija «Fizika jadernyh reaktorov» = Issues of Nuclear Science and Technology. Series «Physics of Nuclear Reactors»*. Moscow: RNC «Kurchatovskij institut», 2008. № 2. pp. 105–116.

5. Vetlugin K.A., Strukov A.V. *Algoritmy avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovaniya nadezhnosti i bezопасnosti informacionnyh i telekommunikacionnyh sistem: ucheb. posobie* (Algorithms of the Automated Structural and Logical Modeling of Reliability and Safety of Information and Telecommunication Systems: Textbook). St.-Petersburg: Peterburgskij universitet putej soobshhenija, 2016. 47 p.

6. Ryabinin I.A. *Nadezhnost i bezопасnost strukturno-slozhnyh sistem* (Reliability and Safety of Structural Complex Systems). St.-Petersburg: Izd-vo S.-Peterburskogo gos. un-ta, 2007. 276 p.

7. Ryabinin I.A., Parfenov Ju.M., Cypin O.D. *Jelektrichestvo = Electricity*. 1994. № 7. pp. 17–23.

8. Henley E.J., Kumamoto H. *Nadezhnost tehniceskikh sistem i ocenka riska* (Reliability of Technical Systems and Risk Assessment). Moscow: Mashinostroenie, 1981. 526 p.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА на 2017 г.

Журнал «Безопасность труда в промышленности»

8256 руб.

Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

1500 руб.

-25 % стоимости печатного издания!



Приобрести электронные издания и получить консультацию можно в отделе распространения, отправив заявку по электронной почте ornd@safety.ru, по тел./факсу (495) 620-47-53, или в интернет-магазине www.shop.safety.ru.

105082, Москва, Переделеновский пер., д. 13, стр. 14, а/я 38

Внимание рекламодателей!

Размещение информации о деятельности вашей компании на страницах журнала «Безопасность труда в промышленности» — это эффективный способ привлечения внимания целевой аудитории.

Отдел рекламы

(495) 620-47-54.

E-mail: ignatova@safety.ru