УДК 621. 316

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

**Черкасова Н.И.**

*Россия, г. Барнаул, АлтГТУ*

**Карнаухова Л.Н.**

*Россия, г. Орел, ГУ «ОрелРЦЭ»*

Рассмотрен новый подход к моделированию и оценки интегрального риска электроустановок на основе марковской цепи. Показано, что процедура формирования и расчета вероятности головного события (электропоражение, пожар) осуществляется путем построения дерева событий.

A new approach to modeling and evaluation of integrated risk for electrical installations based on Markov chain. Shows that the procedure of formation and compute the probability of an event (èlektroporaženie, fire) by building a tree of events.

Анализ рисков, занимающий важное место в проблеме надёжности и безопасности электроустановок, возможен при рассмотрении модели взаимосвязанных между собой компонентов, в результате функционирования которых могут возникать различные техногенные угрозы. Такой моделью, в частности, может быть модель вида (человек – электроустановка – среда). Здесь «человек» выполняет двойственную роль, выступая, с одной стороны, субъектом защиты, а с другой – оператором, выполняя функции, направленные на реализации поставленной цели – обеспечить безопасность при эксплуатации электроустановки. Под опасным состоянием электроустановки будем понимать такое её состояние, которое может привести к риску отказа, т.е. аварий. Последнее может вызвать электропоражение людей и пожары, обусловленные короткими замыканиями, разрывами электрических цепей, искрением в электрических контактных соединениях и т.д. В этой связи представляется актуальным методика оценки электропожаробезопасности технологического объекта и прогнозирование рисков.

Представим процесс возникновения, развития и исхода опасной техногенной ситуации (ОТС), в виде схемы (рис.1).



Рисунок 1 – Модель развития ОТС

При построении модели (Ч – ЭУ – С) можно выделить характерные группы потоков случайных событий: возникновение неисправностей и отказов электроустановки, возникновение ОТС, ее локализация и устранение, вывод электроустановки из эксплуатации, демонтаж, ремонт, пуск в эксплуатацию [1].

При определённых допущениях модель (Ч – ЭУ – С) рассматривается как вероятностная система с определённым числом дискретных состояний. В общем случае имеем k состояний (k=$\overbar{1,n}$). В любой момент времени система может находиться только в одном состоянии. С течением времени система переходит последовательно из одного состояния в другое. Для описания эволюции этой системы введём некоторую последовательность дискретных случайных величин (или случайных функций) R0, R1, …, Rn (индекс n играет роль времени). Если в момент времени t система находится в состоянии Rj, то будем считать, что Rn=j. Таким образом, случайные величины являются номерами состояния системы.

Последовательность R0, R1, …, Rn образует марковскую цепь, если для любого t и любых k0, k1, …, kn, P[R(t)=j] = Rj. Отметим, что для марковских цепей вероятность в момент времени t попасть в состояние Rj , если известна вся предыдущая история изучаемого процесса, зависит только от того, в каком состоянии находится процесс в момент t-1, т.е. при фиксированном «настоящем» «будущее» не зависит от «прошлого». Свойство независимости «будущего» от «прошлого» при фиксированном «настоящим» характерно для марковских цепей [2].

Введём понятие интегрального риска R как некоторой суммы всех последствий ОТС. Будем считать, что все последствия, характеризующиеся потерями или ущербом, приводятся к единому базису – денежному эквиваленту. Тогда интегральный риск может быть представлен в виде некоторой вероятности Rij, а состояние системы (Ч – ЭУ – С) при данном допущении – в виде матрицы вероятностей перехода

R∑ = $\left[\begin{matrix}\begin{matrix}R\_{11}\left(Y\right)&R\_{12}\left(Y\right)… R\_{1n}\left(Y\right)\\R\_{21}\left(Y\right)&R\_{22}\left(Y\right)… R\_{2n}\left(Y\right)\end{matrix}\\\begin{matrix} - -&- -- - - - - \\R\_{n1}\left(Y\right)&R\_{n2}\left(Y\right)… R\_{nn}\left(Y\right)\end{matrix}\end{matrix}\right]$ , (1)

где Rij – вероятность (риск) перехода системы из состояния *i* в состояние *j.*Здесь, согласно [3], Rij = Pij ∙ Yij, где Yij – последствие ОТС (ущерб).

Пусть M1(t) – случайный регулярный однородный марковский процесс, который описывает изменённое во времени техническое состояние электроустановки. Рассмотрим два вида состояния: в электроустановке отсутствуют какие-либо повреждения (ЭУ – исправна; состояние оценивается - «О»); в электроустановке произошёл отказ (пробой изоляции, короткое замыкание, замыкание на землю, разрыв рабочей цепи) – состояние оценивается – «1».

Будем считать M2(t) - марковский процесс, который описывает изменения техногенной опасности в электроустановке. Обозначим через «О» - опасность отсутствует, а через «1» - возникли угрозы ОТС.

Примем M3(t) - марковский процесс, который описывает изменения состояния технических средств электрозащиты. Обозначим через «О» - работоспособное состояние электрозащитных средств, «1» - неработоспособное состояние защиты или её отсутствие.

В электроустановке ОТС (электропоражение, возгорание) может произойти при совпадении во времени трёх процессов M1(t)=1, M2(t)=1, M3(t)=1.

В соответствии с аддитивностью марковских цепей совокупность процессов S(t) (рис. 1) будем рассматривать как один регулярный процесс с восьмью дискретными состояниями и непрерывным временем.

Система в любой момент времени может находиться в одном из множества состояний

S[S1(0,0,0); S2(1,0,0); S3(0,1,0); S4(0,0,1);

S5(0,1,1); S6(1,0,1); S7(1,1,0); S8(1,1,1)], (2)

где

S1(0,0,0) – в электроустановке отсутствуют повреждения, которые могут привести к авариям;

– опасные техногенные ситуации отсутствуют;

– средства электрозащиты находятся в работоспособном состоянии.

S2(1,0,0) – в электроустановке возникли повреждения;

– опасные техногенные ситуации отсутствуют;

– средства электрозащиты находятся в работоспособном состоянии.

Аналогично описываются и другие состояния Sj.

Если система попадает в состояние S8(1,1,1) по логической цепи: «работоспособная электроустановка → авария → появление ОТС → исход ОТС» - происходит электропоражение или пожар.

Для определения времени безопасной работы электроустановки введём параметры процессов M1(t), M2(t) и M3(t), обозначая их через интенсивности переходов **λ1**, **λ2** и **λ3** и **α1, α2** и **α3** – длительности состояния системы при переходе из i в j состояние. Здесь **λ1** = $\frac{1}{\overline{α\_{1}}}$ ,**α 1** = $\frac{1}{α\_{1}}$, где $\overline{α\_{1}}$ $и α\_{1} $– средний интервал времени между возникновениями аварий в электроустановке и средняя длительность существования аварии.

В общем случае ***λi*** *=* $\frac{1}{\overline{α\_{i}}}$ *,**α i*= $\frac{1}{α\_{i}}$, *i =*[$\overbar{1,3}$].

Тогда $\overline{α\_{2}}$, $α\_{2}$ - средний интервал времени между возникновениями ОТС и средняя длительность её существования; $\overline{α\_{3}}$ и $α\_{3}$ - средний интервал времени между отказами средства электрозащиты и среднее время нахождения его в неработоспособном состоянии.

Вероятность исхода ОТС (электропоражение или пожар) в течение времени t из-за появления аварии, возникновения ОТС и отказа в срабатывании средства электрозащиты определяется как

Pисх(t) = 1 – [P1(t) + P2(t) + P3(t) + … + P8(t) ]. (3)

По аналогии с (1) матрица интенсивностей в общем виде примет следующий вид:

λ = $\left[\begin{matrix}\begin{matrix}λ\_{11}&λ\_{12}… λ\_{1n}\\λ\_{21}&λ\_{22}… λ\_{2n}\end{matrix}\\\begin{matrix} -&-- - - \\λ\_{n1}&λ\_{n2}… λ\_{nn}\end{matrix}\end{matrix}\right]$ . (4)

Вероятность нахождения модели (Ч – ЭУ - С) в каждом из восьми возможных состояний S1(0,0,0), S2(1,0,0), … S8(1,1,1) определяется из решения системы уравнений [4].

*P*(t) = $\overbar{P}$(t)A,

где - вектор-строка; А = (λ - I),

где I – единичная матрица, λ – матрица интенсивности переходов.

Рассмотрим методику определения времени безопасной эксплуатации электроустановки. Пусть модель (Ч – ЭУ – С) находилась в течение времени  в состоянии *ii* (событие Аi()) и потом перешла в состояние j (событие Аj()).

Тогда

P[Аij(τ)] = Pij τ -1Pij (5)

Событие перехода системы из некоторого i-го состояния в j-е, независимо от времени пребывания её в i-м состоянии

, (6)

Вероятность события (6), т.е. вероятность перехода модели из одного состояния в другое

. (7)

Если предположить, что событие (6) уже произошло, т.е. модель находилась некоторое время t*i* в состоянии *i* и затем перешла в состояние *j*, то, зная вероятности переходов $P\_{ij}$ можно определить вероятность случайного времени t*i.*

Время безопасной эксплуатации может быть найдено путём последовательного выполнения следующих операций:

1. Определяется вероятности переходов Pij на основании анализа статистических данных или экспертным путём.
2. Фиксируется переход модели в конкретное состояние, допустим из состояния i в состояние j.
3. Определяется длительность αij  этого перехода.
4. Указанный цикл повторяется до тех пор, пока модель не окажется в конечном состоянии, в котором с вероятностью, близкой к единице, не произойдёт конечное событие (электропоражение или пожар). Тогда для одной цепи среднее время безопасности эксплуатации электроустановки

. (8)

Для иллюстрации метода моделирования рисков рассмотрим возникновение пожара в электроустановке 380/220 В. Будем считать, что пожар происходит в результате совпадения во времени следующих случайных событий: пробоя изоляции участка электрической сети, замыкания на землю и появления утечки тока, возникновению порогового значения тока (Iут.пор) вызывающего воспламенение, и отказа защиты.

Дерево событий строится здесь дедуктивно: от возникновения пожара (головного события (А)) к вероятным причинам 1, 2-го и исходного уровня.

При моделировании события возникновения пожара необходимым и достаточным условием является две причины первого уровня: возникновение порогового значения Iут.пор (событие S1) и отказ средства электрозащиты (событие S2) (здесь под отказом условимся понимать неисправность или отсутствие защитного средства). В свою очередь каждая из перечисленных причин (событий) вызваны: пробоем изоляции в сети (событие S3), возникновением замыкания на землю (событие S4), возникновением тока утечки (событие S5). Событие S2 может быть вызвано неисправностью защиты (событие S6) или её отсутствием (событие S7).

На рис. 2 представлено дерево событий, объясняющее процесс возникновения пожара в электроустановке.

Цепь перехода системы в состояние S0 (головное событие) условно представим: S3 - S4 - S5→ S1; S6 → S2; S7 → S2; S1 – S2 = S0. В соответствии с [4, 5] примем следующие вероятности переходов P31= 0,00005; P41= 0,0003; P51= 0,001; P62= 0,001; P72= 0,001; P(1-2)0= 0,0002.



Рисунок 2 – Дерево событий

Тогда расчетное время работы электроустановки до первого профилактического ремонта, если она рассчитана на непрерывную работу в течение пяти лет после ввода её в эксплуатацию (при условии, что уровень пожарной опасности электроустановки 1×10-3 для времени эксплуатации в течение 1 года) составляет не более 1,5 лет. Таким образом, для поддержания заданного уровня пожарной опасности необходимо через полтора года после ввода электроустановки в эксплуатацию проводить профилактический ремонт электроустановки.

Отметим, что из-за отсутствия достоверных статистических данных о вероятностях переходов рассматриваемый пример не отражает реальные условия и служит иллюстрацией предлагаемой методики моделирования рисков электроустановки.

Литература

1. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания // Л.А. Овчаров – М.: Машиностроение, 1969, - 324 с.

2. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ // Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев – М.: Наука, 1965, - 524 с.

3. Измалков В.И., Измалков А.В. Безопасность и риск при техногенных воздействиях // В.И. Измалков, А.В. Измалков – М.: 1994, - 269 с.

4. Коструба С.И. Математическое моделирование систем обеспечения электробезопасности / Электричество, 1970, № 9, С. 87-89.

5. Еремина Т.В. Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок // Т.В. Еремина. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2010. – 215 с.

**Черкасова Нина Ильинична** – к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Электроэнергетика» Рубцовского индустриального института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, тел. 8(38557) 59-860

**Карнаухова Любовь Николаевна** – ведущий инж. ГУ «ОрелРЦЭ», г. Орел, тел. 8(4862) 41 98 30