

УДК 622.621.31-213.34:622.86.

Г. И. Разгильдеев, В. М. Друй

ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РУДНИЧНОГО ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Для оценки свойств безопасности рудничного взрывозащищенного электрооборудования (РВЗЭО) необходимо располагать показателями, учитывающими особенности его функционирования. Для их получения введем условия:

- РВЗЭО обладает функциональной избыточностью
- при повреждении средств взрывозащиты (СВЗ) работоспособность РВЗЭО сохраняется
- СВЗ не обладают отказными признаками

Под функциональной избыточностью РВЗЭО понимаем наличие двух функций – технологической (ТФ) и функции безопасности (ФБ). Технологическая функция (ТФ) обладает отказными признаками, то есть при ее нарушении прекращается технологический процесс (происходит простой машины или забоя и т.п.). Функция безопасности (ФБ) обеспечивается наличием у РВЗЭО взрывонепроницаемой оболочки и других СВЗ, блокировок, искробезопасных электрических цепей и т.п. и она отказными признаками не обладает. При ее нарушении отказ не наступает и технологический процесс не прерывается, если это нарушение не будет обнаружено лицами надзора, которые в силу действующих Правил обязаны принять меры к устраниению выявленных нарушений, или в результате ревизий. Таким образом, принято, что при повреждении СВЗ РВЗЭО может переходить из исправного состояния в работоспособное, но неисправное, в то время как при отказе оно переходит из исправного или работоспособного состояний – в неработоспособное. Из приведенного пояснения следует, что для характеристики каждой из этих функций – ТФ и ФБ – необходимо располагать своими критериями и показателями. Применительно к ТФ эти показатели известны – они приведены в ГОСТ 27.002. Показателей, характеризующих ФБ, в нормативных документах в настоящее время нет.

Для получения показателей, характеризующих свойства безопасности РВЗЭО, рассмотрим четыре состояния, в которых оно может находиться, E_1 – исправное – функция безопасности (ФБ) и технологическая функция (ТФ) сохраняются; E_2 – работоспособное – сохраняется ТФ; E_3 – неработоспособное (отказ) – нарушена ТФ; E_4 – неисправное – нарушена ФБ.

На рис. 1, а показаны эти состояния, возможные ситуации, возникающие при эксплуатации РВЗЭО и соответствующие им графы переходов. Каждая из этих ситуаций обозначена цифрой, а между собой они разделены пунктирными вертикальными линиями.

При этом исходим из следующих допущений:

- переходы РВЗЭО из исправного состояния в неработоспособное происходят под воздействием потока отказов с интенсивностью

$$\lambda = 1/T_O \quad , \quad (1)$$

а обратно – под воздействием потока восстановлений с интенсивностью

$$\mu = 1/T_B \quad , \quad (2)$$

где T_O – средняя наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления работоспособного состояния,

- поток отказов состоит из суммы потоков первого и второго рода:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 .$$

Отказы первого рода, характеризующиеся интенсивностью λ_1 , не приводят к повреждению СВЗ РВЗЭО. Отказы второго рода λ_2 могут сопровождаться одновременным повреждением СВЗ, блокировок и т.п.;

- интенсивность отказов первого рода связана с общей интенсивностью λ соотношением

$$\lambda_1 = \lambda \prod_{i=1}^n P_i$$

где P_i – вероятность того, что при отказе i -го узла, обеспечивающего одновременно ТФ и ФБ, не будут повреждены СВЗ, т.е. не будет нарушена ФБ; n – число узлов РВЗЭО, при отказах которых возможны повреждения СВЗ, т.е. нарушения ФБ;

- повреждения СВЗ возможны в результате отказов второго рода, при транспортировании РВЗЭО и при погрузочно-разгрузочных операциях из-за ошибок или преднамеренных действий персонала при восстановлении РВЗЭО при возникновении отказов первого и второго рода, а также при демонтажно-монтажных работах и при техническом обслуживании;

- интенсивность отказов второго рода связана с общей интенсивностью λ соотношением

$$\lambda_2 = \lambda - \lambda_1 = \lambda - \lambda \prod_{i=1}^n P_i = \lambda \left(1 - \prod_{i=1}^n P_i \right).$$

Отказы первого и второго рода могут быть получены из опыта эксплуатации РВЗЭО.

На рис. 1а цифкой 1 обозначена ситуация, когда после некоторого периода T_{II} эксплуатации РВЗЭО в исправном и работоспособном состояниях возникает отказ первого рода, переводящий его из состояния E_1 в E_3 , т.е. из исправного в неработоспособное.

тоспособное. В течение времени T_{B1} проводится восстановление работоспособности, в результате чего изделие или объект возвращается в исправное состояние E_1 .

Дифференциальные уравнения переходных вероятностей Чепмена – Колмогорова для этой ситуации имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{1,1}(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_{1,1}(t) + \mu_1 P_{3,1}(t); \\ \frac{dP_{3,1}(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_{1,1}(t) + \mu_1 P_{3,1}(t); \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

где λ_1 и μ_1 – соответственно, интенсивности отказов и восстановлений первого рода; $P_{1,1}(t)$ переходная вероятность для исправного состояния по отношению к отказам первого рода; $P_{3,1}(t)$ – то же для состояния E_3 .

Решение системы (3) известно [3]:

$$\left. \begin{aligned} P_{1,1}(t) &= \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \exp[-(\lambda_1 + \mu_1)t] \\ P_{3,1}(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \{1 - \exp[-(\lambda_1 + \mu_1)t]\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При $t \rightarrow \infty$ имеем

$$\left. \begin{aligned} P_{1,1} &= \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}; \\ P_{3,1} &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \approx \lambda_1 \cdot T_B, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $P_{1,1}$ – вероятность исправного состояния по отношению к отказам первого рода; $P_{3,1}$ – вероятность простого (аварийного простого) по отношению к отказам первого рода.

Для практического применения удобно время восстановления работоспособности заменить временем аварийного простого $t_{a,sp}$. Тогда вероятность простого (аварийного простого) будет:

$$P_{3,1} \approx \lambda_1 \cdot t_{a,sp} \quad (6)$$

Из системы уравнений (5) следуют стандартизованные (ГОСТ 27.002) показатели надежности, а именно: средняя наработка на отказ $T_O = 1/\lambda_1$, среднее время восстановления $T_B = 1/\mu_1$, коэффициент готовности $K_c = T_O / (T_O + T_B)$, вероятность безотказной работы $P(t) = \exp(-\lambda_1 t)$, коэффициент простого (вероятности простого) $K_n P_{np} = T_B / (T_O + T_B)$.

Цифрой 2 на рис. 1а обозначен отказ, при котором произойдет одновременное повреждение СВЗ РВЗЭО, т.е. отказ второго рода, который возникает под воздействием потока отказов с параметром λ_2 .

Для рассмотрения этой ситуации необходимо ввести следующие допущения:

- поток отказов и повреждений СВЗ ординарный и стационарный во времени;
- возникающие повреждения СВЗ не приводят к другим повреждениям таких же средств;
- при восстановлении работоспособности РВЗЭО (ТФ) полностью восстанавливается и ФБ.

Из диаграммы на рис. 1, а видно, что в резуль-

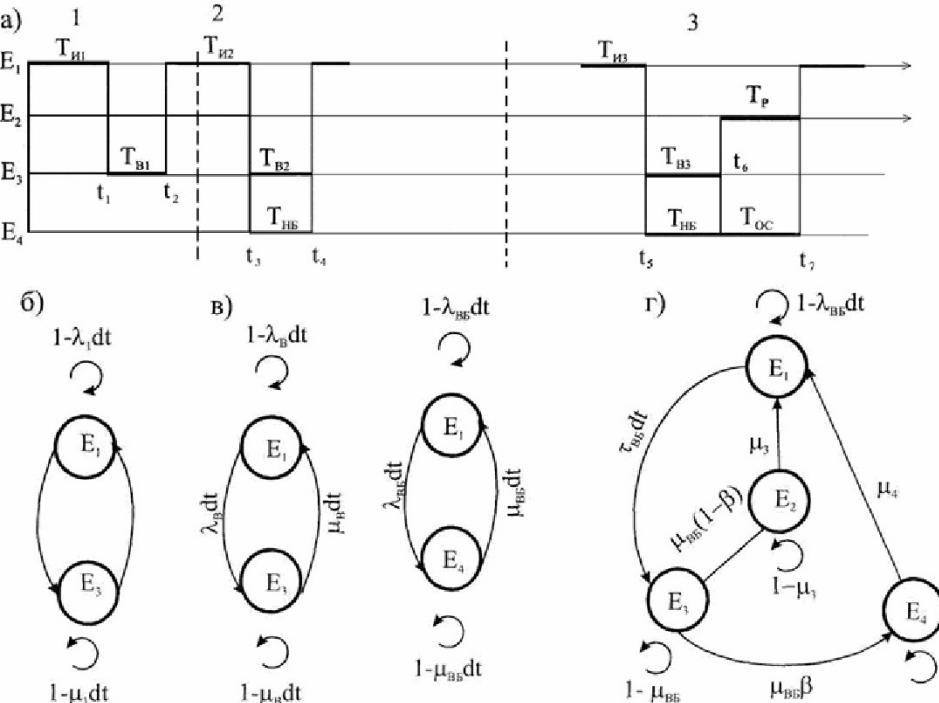


Рис.1. Гипотетические состояния РВЗЭО при эксплуатации: а- временная диаграмма; б, в, г – графы переходов

тате отказа второго рода РВЗЭО переходит в два состояния – E_3 и E_4 , что возможно, если параметр λ_2 имеет двойной смысл: $\lambda_{2\beta}$ – означает отказ РВЗЭО, а $\lambda_{2\beta B}$ – повреждение СВЗ при этом отказе. Следовательно, ситуацию, обозначенную цифрой 2, можно представить в виде математической модели, содержащей два графа переходов – левый и правый на рис. 1, в. Параметры $\lambda_{2\beta}$ и $\lambda_{2\beta B}$ численно равны, но приводят к разным последствиям – отказам и повреждениям, соответственно. Интенсивности восстановлений также численно равны, но последствия их воздействий одинаковые – объект возвращается в исправное состояние E_1 .

Дифференциальные уравнения для левого графа рис. 1в идентичны системе (5), также как и их решения.

Смысль получаемых вероятностей $P_{1,2}$ и $P_{3,2}$ такой же, как и из системы (4): $P_{1,2}$ – вероятность исправного состояния РВЗЭО по отношению к отказам второго рода; $P_{3,2}$ – вероятность простоя (аварийного простоя) РВЗЭО по отношению к отказам второго рода.

Дифференциальные уравнения для правого графа на рис. 1в имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{1,2}(t)}{dt} &= \lambda_{\beta B} P_{1,2}(t) + \mu_{\beta B} P_{3,2}(t); \\ \frac{dP_{4,2}(t)}{dt} &= -\lambda_{\beta B} P_{1,2}(t) + \mu_{\beta B} P_{4,2}(t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение для системы уравнений (7) по аналогии с (4) при $t \rightarrow \infty$ имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{12} &= \frac{\mu_{\beta B}}{\mu_{\beta B} + \lambda_{\beta B}}; \\ P_{42} &= \frac{\lambda_{\beta B}}{\mu_{\beta B} + \lambda_{\beta B}}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $P_{1,2}$ – вероятность исправного состояния СВЗ по отношению к отказам второго рода; $P_{4,2}$ – вероятность опасного состояния СВЗ по отношению к отказам второго рода.

При допущении об экспоненциальном распределении времени пребывания в исправном состоянии T_I и времени восстановления исправного состояния T_{HB} получаем:

$$T_{I2} = \frac{1}{\lambda_{2\beta B}}; \quad T_{IB} = \frac{1}{\mu_{2\beta B}}. \quad (9)$$

Тогда вероятность исправного состояния СВЗ по отношению к отказам второго рода будет

$$P_{1,2} = \frac{T_{I2}}{T_{I2} + T_{HB}}, \quad (10)$$

и вероятность опасного состояния СВЗ

$$P_{4,2} = \frac{T_{HB}}{T_I + T_{HB}}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует два показателя свойств безопасности СВЗ РВЗЭО:

– среднее время пребывания в исправном состоянии – $T_{I,cp}$;

– среднее время восстановления свойств безопасности СВЗ (исправного состояния) – $T_{I,cp} = T_{BS}$.

Из соотношения

$$P_{42} = \frac{\lambda_{\beta B}}{\lambda_{\beta B} + \mu_{\beta B}} \{1 - \exp[-(\lambda_{\beta B} + \mu_{\beta B})t]\},$$

при $\mu_{\beta B} = 0$ (восстановление отсутствует) получаем еще два показателя: вероятность работы РВЗЭО без повреждений СВЗ:

$$R_{CB3}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{\beta B} t) \quad (12)$$

и вероятность работы РВЗЭО с поврежденными СВЗ:

$$\Phi_{CB3}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{\beta B} t). \quad (13)$$

Значения λ и $t_{a,cp}$ для многих видов РВЗЭО известны [2].

Задаваясь соотношениями между общей интенсивностью отказов λ конкретных видов РВЗЭО и λ_2 (интенсивностью отказов второго рода), можно определить числовые значения показателей свойств безопасности РВЗЭО – среднего времени пребывания в исправном состоянии $T_{I,cp}$, среднего времени восстановления исправного состояния СВЗ T_{BS} , вероятности исправного состояния $R_{CB3}(t)$ и вероятности повреждения СВЗ $Q_{CB3}(t)$.

Рассмотрим ситуацию, обозначенную на рис. 1а цифрой 3. Она возникает при отказе второго рода (с нарушением ФБ), когда из-за некачественного выполнения работы в результате ошибки или преднамеренных действий персонала повреждение СВЗ не устраняется и через время T_B РВЗЭО переходит из неисправного E_4 и неработоспособного E_3 состояний не в исправное E_1 , как это должно быть, а только в работоспособное E_2 , оставаясь неисправным, т.е. в состоянии E_4 . Длительность пребывания в этом состоянии T_{oc} определяется периодичностью осмотров или ревизий РВЗЭО, когда повреждение или нарушение СВЗ может быть выявлено и устранено. Из этого следует, что РВЗЭО в процессе эксплуатации, будучи работоспособным, может пребывать в опасном состоянии в течение времени T_{OC} . Следовательно, к числу показателей, характеризующих свойства безопасности РВЗЭО, необходимо добавить длительность его пребывания в опасном состоянии T_{OC} .

Граф переходов на рис. 1, г соответствует рассматриваемой ситуации. Здесь через β обозначена вероятность того, что при восстановлении работоспособности после отказа второго рода ФБ не будет восстановлена. Очевидно, что при $\beta = 0$, т.е. при высококачественном восстановлении, этот график преобразуется к графикам на рис. 1, в. Длительность пребывания РВЗЭО в неисправном (опасном) состоянии T_{OC} (ФБ нарушена, но рабо-

тоспособность сохраняется) является, как отмечено выше, одним из показателей его свойств безопасности. Именно при эксплуатации РВЗЭО в этом состоянии возможны взрывы и пожары в подземных разработках из-за неисправности РВЗЭО.

Из приведенных логических построений следует, что в процессе восстановления исправного состояния оперативно – ремонтный или ремонтный персонал может либо устраниить повреждение СВЗ, либо не устраниить и включить РВЗЭО в работу в опасном для эксплуатации состоянии. Качество процесса восстановления и ремонтопригодность СВЗ РВЗЭО можно характеризовать вероятностью восстановления исправного состояния

$$G_R = 1 - \beta, \quad (14)$$

где β – вероятность того, что в процессе восстановления РВЗЭО его исправное состояние не будет восстановлено.

Из графа переходов на рис. 1, г можно получить вероятность повреждения СВЗ РВЗЭО вследствие действий персонала (ошибочных или преднамеренных при выполнении монтажных или демонтажных работ при переноске РВЗЭО на новое место установки).

Появление хотя бы одного повреждения средств взрывозащиты приводит РВЗЭО в опасное для эксплуатации во взрывоопасной среде состояние. Вероятность этого события определяется по формуле биномиального распределения (по формуле Бернулли):

$$P_{1,m} = (m! \cdot p^k q^{m-k}) / k!(m-k)! \quad (15)$$

где m – число средств взрывозащиты одного вида электрооборудования; p – вероятность ошибочных действий персонала при выполнении демонтажно-монтажных работ; q – вероятность того, что не будет допущена ошибка персоналом при выполнении демонтажно-монтажных работ; k – число повреждений средств взрывозащиты одного вида

Показатели свойств безопасности РВЗЭО

№ п/п	Наименование показателя	Обозна- чение	Характеризуемое свойство
1	Вероятность опасного состояния вида электрооборудования	R_{OC}	Опасное для эксплуатации во взрывоопасной среде состояние
2	Вероятность исправного состояния вида электрооборудования	R_{IC}	Безопасное состояние
3	Вероятность повреждения средств взрывозащиты вида электрооборудования при выполнении первоначального монтажа или демонтажно-монтажных работ (ДМР*)	$P_{1,m}$	Событие, состоящее в повреждении хотя бы одного средства взрывозащиты при первоначальном монтаже или ДМР при переноске РВЗЭО
4	Среднее время восстановления исправного состояния СВЗ (среднее время ремонта)	T_{BS}	Ремонтопригодность РВЗЭО и СВЗ
5	Вероятность восстановления исправного состояния средств взрывозащиты РВЗЭО	G_R	Ремонтопригодность РВЗЭО и СВЗ
6	Длительность пребывания РВЗЭО с неисправным средством взрывозащиты	T_{OC}	Периодичность ревизий и свойства безопасности РВЗЭО

ДМР* - демонтажно-монтажные работы при переноске РВЗЭО на новое место установки.

электрооборудования.

При $k = 1$ формула принимает вид

$$P_{1,m} = (m! \cdot p q^{m-1}) / (m-1)! \quad (16)$$

Показатели свойств безопасности РВЗЭО, которые характеризуют процесс его функционирования в качестве объекта, находящегося в эксплуатации во взрывоопасной среде, приведены в таблице.

Вероятности опасного и исправного состояний могут быть получены расчетным путем при условии, что известны вероятности возникновения видов повреждений. Эти вероятности определяются по результатам ревизий РВЗЭО, записываемых в Книги, которые ведутся на шахтах, или на основе специальных исследований. Также расчетным путем определяется вероятность повреждения СВЗ при вскрытии частей взрывонепроницаемой оболочки при выполнении первоначального монтажа или ДМР при переноске РВЗЭО на новое место установки. При этом необходимо учитывать, что возникновение хотя бы одного повреждения СВЗ приводит РВЗЭО в опасное для эксплуатации во взрывоопасной среде состояние.

Эти три вероятности характеризуют технический уровень РВЗЭО. Чем выше эти показатели, тем безопаснее РВЗЭО в эксплуатации. Область применения этих показателей - оценка технического уровня электрооборудования по свойствам безопасности при его разработке и в эксплуатации.

Среднее время восстановления исправного состояния средств взрывозащиты (среднее время ремонта) – статистический показатель, который получают на предприятиях, имеющих право ремонтировать взрывозащищенное электрооборудование. Назначение этого показателя – планирование периодичности технического обслуживания и ремонтного персонала.

С помощью приведенных в таблице показате-

лей свойств безопасности можно оценить эти работы, так и при эксплуатации. свойства РВЗЭО любого вида как в процессе раз-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разгильдеев Г.И., Ефременко В. М., Друй В. М., Светоносов Д.С. Характеристики и причины повреждаемости средств взрывозащиты рудничного взрывозащищенного электрооборудования / В кн. IX. Международная научно-практическая конференция. Энергетическая безопасность России. Тезисы докладов. Кемерово, 2007. – с.74-75.
2. Разгильдеев Г. И., Серов В. И. Безопасность и надежность взрывозащищенного электрооборудования. – М. Недра, 1992. – 207с., ил.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учебн. для вузов. – 6-е стер. изд. –М.: Высш. шк., 1999. – 576 с., ил.

Авторы статьи:

Разгильдеев Геннадий Иннокентьевич - докт. техн. наук, проф. каф. электроснабжения горных и промышленных предприятий КузГТУ, rgi.egpp@kuzstu.ru	Друй Владислав Михайлович - ст. преподаватель каф. электроснабжения горных и промышленных предприятий КузГТУ, тел.: 8(3842)25-45-69
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------