

УДК 519.673

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С. В. ШИЛЬКО, кандидат технических наук

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук

Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси им. В. А. Белого, Гомель, Беларусь

Обсуждаются источники риска, обусловленные сбоями в технологическом оборудовании вследствие электромагнитного импульса, перегрева, износа и других факторов. Показано, что решение проблемы минимизации риска может быть получено на основе моделирования устойчивости технологического режима. В качестве примера разрабатывается вероятностная модель влияния электромагнитного импульса на технологический режим.

Ключевые слова: моделирование, технологические процессы, чрезвычайные ситуации, риски.

Введение. Ряд технологических процессов в химической, нефтехимической и энергетической отраслях, а также трубопроводном, железнодорожном и авиационном транспорте является источником значительной опасности при отказе (сбое) оборудования или системы управления. Комплексное решение проблемы безопасности ответственных технологических процессов (ОТП) и минимизации риска чрезвычайных ситуаций возможны на основе моделирования устойчивости режима работы оборудования, учитывающего характеристики повреждающего воздействия и средств защиты.

Основная часть. Широкое применение получили вероятностные модели устойчивости к воздействию механических нагрузок (К. Капур, Л. Ламберсон, Л. А. Сосновский) и электромагнитных помех (К. А. Бочков, А. Шваб, Л. Н. Кечиев). В соответствии с этими моделями уровень устойчивости оборудования ОТП характеризуется вероятностью сбоя $P_{сб}$. Уровни нагрузок и защищенности оборудования являются случайными величинами, описываемыми дифференциальными и интегральными функциями распределения. Вероятность сбоя вычисляется по формуле

$$P_{сб} = \int_0^{\infty} p(y)P(x)dy, \quad (1)$$

где y – характеристика помехи и нагрузки; x – характеристика помехозащищенности; $p(y)$ – плотность вероятности распределения помех (нагрузок); $P(x)$ – функция распределения устойчивости.

Зная вероятность сбоя, можно определить риск эксплуатации системы. Риск есть отношение вероятности сбоя к вероятности безотказной работы. Сумма этих вероятностей равна единице. Из этого следует, что

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{P_{сб}} - 1}, \quad (2)$$

где ρ – риск.

Для значений риска выделяются следующие условия эксплуатации:

- $0 < \rho < 1$ – ограниченная безопасность;
- $\rho = 1$ – критическое состояние, наличие отказов;
- $\rho > 1$ – опасное состояние, угроза аварии;
- $\rho \gg 1$ – запредельное состояние, угроза катастрофы.

Во многих случаях (электромагнитные помехи, перегрев, механический износ) можно считать, что сбой оборудования или его критическое состояние возникает с вероятностью, равной единице, если энергия помех или нагрузок превысит критический уровень $W_{кр}$.

Тогда функция распределения устойчивости записывается следующим образом

$$P(W) = e(W - W_{нор}), \quad (3)$$

где e – единичная функция.

Формула (1) принимает вид

$$P_{сб} = \int_{W_{нор}}^{\infty} P(W) dw \quad (4)$$

Однако практическое использование формулы (4) затруднено сложностью измерения плотности распределения энергии помех или нагрузок. Эту трудность можно преодолеть применяя метод линеаризации, сущность которого рассмотрим на примере электромагнитных помех.

Импульсы электромагнитных помех (электростатический разряд, нано- и микросекундные импульсы тока, импульсные магнитные поля) могут быть представлены биэкспоненциальной функцией и аппроксимированы треугольным импульсом вида

$$u(t) = \begin{cases} \frac{U}{\tau_1} \tau & \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ \frac{U}{\tau_2 - \tau_1} (\tau - \tau_2) & \text{при } \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \end{cases}, \quad (5)$$

где U – амплитуда импульса, В; τ – время, с; τ_1 – длительность фронта импульса, с; τ_2 – длительность спада импульса, с.

Энергия электромагнитного импульса, рассеянная во входной цепи устройства управления, равна

$$W = \frac{4U^2 R_{ax} \tau_2}{3(R_{ax} + z)^2}, \quad (6)$$

где R_{ax} – омическое сопротивление входной цепи, Ом, z – волновое сопротивление линий связи, Ом.

По причине технологического разброса входное сопротивление имеет нормальное распределение. Напряжение импульсов как характеристика, зависящая от многих случайно изменяющихся факторов, согласно центральной предельной теореме также подчиняется нормальному закону. На основании опыта принимается, что длительность импульсов и сопротивление линий связи имеет пренебрежимо малый разброс. Тогда можно полагать, что энергия помехи также распределена по нормальному закону с параметрами:

– математическое ожидание

$$W_\mu = \frac{4U_\mu^2 R_{ax,\mu} \tau_2}{3(R_{ax,\mu} + z)^2}, \quad (7)$$

где W_μ – математическое ожидание энергии помех, В; U_μ – математическое ожидание амплитуды импульса, В; $R_{ax,\mu}$ – математическое ожидание входного сопротивления, Ом.

– среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_W = \left(\frac{\partial W}{\partial R_{ax}} \right) \sigma_{R_{ax}} + \left(\frac{\partial W}{\partial U} \right) \sigma_{U_i}, \quad (8)$$

где σ_W – среднеквадратичное отклонение энергии помех; $\sigma_{R_{ax}}$ – среднеквадратичное отклонение входного сопротивления; σ_U – среднеквадратичное отклонение амплитуды импульса.

Использование такого закона распределения при расчетах по формуле (4) приводит к вероятностным соотношениям для сбоя оборудования ОТП в соответствии с общей теорией вероятности.

Таким образом, рассмотренная модель позволяет анализировать условия работы ответственного технологического оборудования, устанавливать качественные и количественные характеристики безопасности протекания технологического процесса, выявляющие угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций.

В качестве приложения рассмотрим схему реализации команд из состава системы телеуправления ОТП. Управление исполнительным реле в данной схеме осуществляется как электронными модулями, так и контактными реле. При переключении этих контактов возникают наносекундные импульсы помех в цепях управления. На основании практики эксплуатации указанных систем принимается, что математическое ожидание амплитуды помех равно 4000 В, среднеквадратическое отклонение

амплитуды – 100 В, длительность спада импульса – 40 нс. Электронный модуль управления имеет следующие характеристики: математическое ожидание входного сопротивления цепи управления – 10^4 Ом при среднеквадратическом отклонении 10 Ом, волновое сопротивление линий связи модуля управления – 600 Ом.

Согласно справочным данным, пороговое значение энергии помех, вызывающее сбой электронных устройств, составляет $8 \cdot 10^{-7}$ Дж. Расчет по формулам (4), (7) и (8) показывает, что вероятность сбоя при таких условиях составляет 0,414. Это значение недостаточно для обеспечения безопасности системы управления ОТП. Таким образом, в рассмотренном примере для повышения уровня безопасности требуется предусмотреть устройства подавления помех.

Выводы. Проанализированы источники риска, обусловленные сбоями в технологическом оборудовании вследствие электромагнитного импульса, перегрева, износа и других факторов. Предложенная вероятностная модель позволяет анализировать условия работы ответственного технологического оборудования, устанавливать качественные и количественные характеристики безопасности протекания технологического процесса, выявляющие угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций.

Поступила в редакцию 19.09.06.

Shilko S. V., Komnatny D. V.

MODELING TO SAFETY OF THE RESPONSIBLE TECHNOLOGICAL PROCESSES.

The sources of risk caused by technological equipment failure under electromagnetic impulse, extra heating, wear and other factors are discussed. It's shown that solution of risk minimization problem may be obtained on the base of modeling of stability of technological regime. For example, the probabilistic model of the electromagnetic impulse influence on technological regime is developed.