

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.9 + 681.51

В.А. Багацкий, А.В. Багацкий

СТЕПЕНЬ СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НОРМЕ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Ключевые слова: технологический процесс, степень соответствия норме, функциональная безопасность, показатель функциональной безопасности.

Введение

Как правило, большинство технологических процессов осуществляется с помощью специального управляемого оборудования (УО), которое поддерживает необходимые для протекания процесса параметры. В качестве системы управления УО используются средства автоматики и вычислительной техники с соответствующим программным обеспечением. Компьютерные системы управления УО все чаще применяются для выполнения функций обеспечения безопасности [1, 2], так как отклонение параметров технологических процессов от номинальных значений может приводить к появлению опасных ситуаций, аварий и даже техногенных катастроф.

В настоящее время существуют стандарты разработки, построения и обслуживания систем обеспечения безопасности на всех стадиях их жизненного цикла. Это международный стандарт IEC 61508-2010 «Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems» и полностью идентичный российский стандарт ГОСТ Р МЭК 61508 – 2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью». Стандарты состоят из семи частей, в каждой функциональная безопасность рассматривается с определенной стороны, начиная со словаря терминов, безопасности аппаратных и программных средств, обзора методов и средств повышения функциональной безопасности. Суммарный объем всех частей стандарта — 450 страниц.

Анализ стандарта по функциональной безопасности

Базовыми понятиями стандарта являются риск, отказ, функциональная безопасность, уровень полноты безопасности.

Риск — это сочетание вероятности события причинения вреда и тяжести этого вреда. Тяжесть вреда разбита на четыре качественные группы. Тяжелые последствия с многочисленными человеческими жертвами, большим вредом для окружающей среды и экономики — четвертая группа. Незначительные последствия, мелкие травмы у оператора — первая группа.

Отказом называется прекращение способности функционального блока выполнять свою функцию. Отказы бывают опасные и безопасные, диагностируемые и недиагностируемые. Опасные диагностируемые отказы считаются безопасными.

Функциональная безопасность — часть общей безопасности, обусловленной применением УО. Создание системы безопасности требует значительных расходов. Поэтому если необходимо обеспечить безопасность технологического процесса, отказы в котором могут привести к тяжелым последствиям, то уровень полноты безопасности должен быть высоким с низкой частотой отказов, а для процессов, отказы в которых приносят незначительный вред, уровень полноты безопасности может быть значительно ниже.

Например, для систем функциональной безопасности, которые работают в непрерывном режиме контроля безопасности, наивысший уровень полноты безопасности (SIL4, УПБ4) требует разработки такой системы, для которой средняя частота опасных недиагностируемых отказов была бы не выше, чем 10^{-8} – 10^{-9} 1/ч. Для систем с незначительными последствиями отказа средняя частота опасного отказа (SIL1, УПБ1) должна быть не выше, чем 10^{-5} 1/ч.

Эти цифры являются нормой, которую необходимо соблюдать на стадии проектирования аппаратных средств, и характеризуют среднюю интенсивность случайных недиагностируемых отказов. Если расчетные значения на стадии проектирования не удовлетворяют нормам, то необходимо применять специальные меры по снижению интенсивности отказов. Обзор методов и средств по снижению интенсивности отказов приведен во второй и седьмой частях упомянутых нормативных документов.

Таким образом, численная оценка уровня полноты безопасности технологических процессов и УО по недиагностируемым случайным отказам производится на стадии их проектирования с использованием вероятностных методов.

В стандарте рассмотрены виды отказов и методы снижения их интенсивности для различных групп аппаратуры. Параметры большинства технологических процессов являются аналоговыми величинами, поэтому в соответствии со стандартом рассмотрим виды отказов датчиков, аналогового входа/выхода, исполнительных элементов, источников питания. У этих элементов УО, как и в технологических процессах, существуют отказы типов отклонений и колебаний при постоянном токе, неисправностей при постоянном токе, дрейфов и колебаний. Основными методами диагностирования таких отказов является мониторинг и текущий контроль аналоговых сигналов в режиме on-line, а также сравнение входных данных и использование эталонных датчиков [1, 2].

Текущий контроль аналоговых данных в режиме on-line или сравнение входных аналоговых данных — это хорошо известный допусковый контроль.

Допусковый контроль

Любой технологический процесс и УО характеризуются номинальными значениями параметров, а также их допустимыми отклонениями, при которых процесс или УО остаются в работоспособном состоянии. Наиболее важные параметры процессов и УО постоянно контролируются с помощью методов и устройств допускового контроля, т.е. определяется, произошел отказ или нет.

Контроль каждого отдельного параметра реализуется в соответствии с выражением (1)

$$y_c(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{b\max} > x > x_{b\min}, \\ 0, & \text{если } x_{b\min} \geq x \geq x_{b\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где x — аналоговая контролируемая величина, $x_{b\max}$, $x_{b\min}$ — верхняя и нижняя допустимые границы изменения x , $y_c(x)$ — функция контроля.

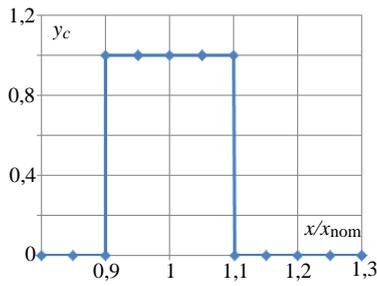


Рис. 1

и нижней допустимых границ изменения контролируемой величины, но невозможно определить, где в пределах окна она находится.

Результаты многопараметрического контроля технологического процесса или УО в целом вычисляются как конъюнкция цифровых результатов контроля отдельных параметров (2)

$$y_{all} = y_1 \wedge y_2 \wedge \dots \wedge y_j \wedge \dots \wedge y_k, \quad (2)$$

где y_{all} — функция многопараметрического контроля, y_j — значения функции контроля j -го параметра, k — количество диагностируемых параметров.

При контроле нет необходимости знать значения контролируемой величины. С этой точки зрения контроль является операцией сжатия информации, устранение ненужных в данном случае сведений об объекте контроля [3].

На уровне однопараметрического контроля аналоговый контролируемый параметр превращается в цифровую величину объемом в один бит, что значительно сжимает аналоговую информацию. На многопараметрическом уровне двоичная информация по каждому параметру снова сжимается до одного бита и определяется, работоспособны ли в целом технологический процесс и УО.

В стандарте нет сведений о возможности численной оценки на стадии эксплуатации уровня безопасности технологического процесса и УО по диагностируемым отказам в каждый момент времени или за заданный временной интервал.

Цель публикации — разработать методы численной оценки уровня безопасности технологического процесса и управляемого оборудования на стадии эксплуатации по диагностируемым отказам в каждый момент времени или за заданный временной интервал.

Функции соответствия и коэффициент соответствия норме

При допусковом контроле на стадии эксплуатации отказ возникает одномерно, при переходе контролируемой величины через верхнюю или нижнюю границу допустимых отклонений. Полагаем, что уровень функциональной безопасности технологического процесса и УО наивысший при равенстве контролируемого параметра своему номинальному значению и равен нулю при выходе контролируемого параметра за границы допустимых отклонений, т.е. при отказе.

В данной работе в зоне допустимых отклонений предлагается оценивать (диагностировать) функциональную безопасность как инверсию модуля взвешенного отклонения контролируемой величины от ее номинального значения.

Если контролируемая величина равна номинальному значению, то оценка равна единице.

Если отклонение от номинального значения не больше допустимых отклонений, то, в зависимости от величины отклонения, оценка может быть в диапазоне от единицы до нуля.

Если контролируемая величина превышает или равна допустимым отклонениям, то оценка равна нулю.

Для реализации подобного предложения диапазонное окно должно отличаться от прямоугольного окна допускового контроля.

При цифровом преобразовании Фурье периодических сигналов используется понятие временного окна [4]. В окне реализуется весовая функция. Есть треугольная (Бартлетта), косинусно-квадратичная (Ханна), взвешенно-косинусная (Наттола), усеченная (Гаусса), равноволновая (Чебышева) весовые функции. У них всех в середине окна коэффициент взвешивания равен единице, а по краям окна равен или близок нулю. Применение каждой функции имеет свои преимущества и недостатки. Например, окно Наттола имеет минимальный уровень боковых лепестков в частотной области, но достаточно широкий основной лепесток, у Чебышевского окна все боковые лепестки одинакового уровня, а основной лепесток самый узкий и т.д. [4].

В данной работе используется не временное, а диапазонное окно.

Процессы, из-за которых возникают отказы при изменении аналоговых величин, не являются периодическими. Поэтому желательно применять не весовые синусно-косинусные функции, а более простые — алгебраические. Кроме этого, целесообразно использовать функцию, форму которой можно достаточно просто изменять с помощью изменения одного параметра, т.е. функция должна быть достаточно универсальной.

Рассмотрим параболические степенные функции вида $y_p^m = (ax^2 + bx + c)^m$, в которых m может быть заданным от 0 до ∞ . Если показатель степени m изменяется от единицы до нуля, то y_p^m будет стремиться к прямоугольной функции контроля, в которой отклонение параметра от номинального до максимально допустимого значения не меняет значения весовой функции. Если m изменяется от 1 до ∞ , то степенная функция будет стремиться к дельта-функции, в которой при малейшем отклонении параметра от номинального значения весовая функция становится равной нулю. На рис. 2 приведены графики степенных параболических функций $y_p^m = (ax^2 + bx + c)^m$, с $m = 1/8$, $m = 1$, $m = 8$ для диапазонного окна с допустимым отклонением от номинального значения $\pm 20\%$.

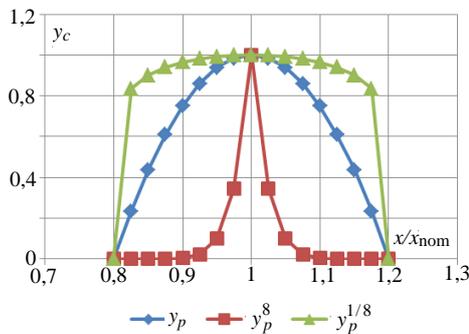


Рис. 2

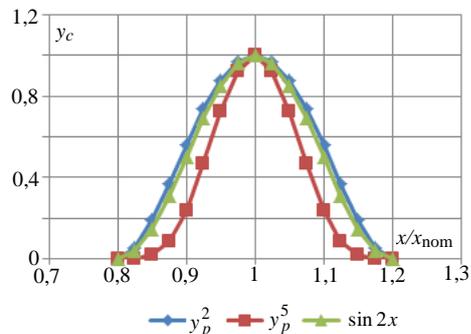


Рис. 3

На рис. 3 показаны синусно-квадратичная функция Ханна и две степенные параболические функции. Как видно из рисунка, функция y_p^2 подобна функции Ханна, а y_p^5 подобна взвешенно-синусной функции Наттола, что свидетельствует о достаточной универсальности степенной параболической функции.

Функции, которые характеризуют положение контролируемого параметра в области допустимых значений, будем называть функциями соответствия норме, или сокращенно — функциями соответствия. Степенная параболическая функция соответствия описывается соотношениями

$$y_p^m(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = x_{nom} \\ [a \cdot (x/x_{nom})^2 + b \cdot (x/x_{nom}) + c]^m, & \text{если } x_{b\max} > x > x_{b\min} \\ 0, & \text{если } x_{b\min} \geq x \geq x_{b\max} \end{cases} \quad (3)$$

где a, b, c, m — задаваемые параметры степенной параболической функции, x — значение контролируемого параметра, x_{nom} — номинальное значение контролируемого параметра, $y_p^m(x)$ — степенная параболическая функция соответствия.

Функция контроля показывает, находится контролируемый параметр в зоне допустимых отклонений или произошел отказ, а функция соответствия норме определяется как инверсия взвешенного модуля отклонения контролируемого параметра от номинального значения. Ее значения могут изменяться в диапазоне от единицы до нуля. Вне зоны допустимых отклонений функция соответствия равна нулю.

Значение функции соответствия для каждого конкретного значения диагностируемого параметра будем называть коэффициентом соответствия параметра норме или коэффициентом функциональной безопасности K_S . Наивысшему уровню безопасности по диагностируемому параметру соответствует значение $K_S = 1$, а отказу — $K_S = 0$.

Функциональная безопасность многопараметрического процесса

Коэффициент соответствия норме или коэффициент функциональной безопасности многопараметрического процесса и УО в целом определим как произведение коэффициентов функциональной безопасности по каждому диагностируемому параметру

$$K_{Sall} = \prod_{j=1}^k K_{Sj}, \quad (4)$$

где j — номер диагностируемого параметра, k — количество диагностируемых параметров, K_{Sj} — значение коэффициента функциональной безопасности по j параметру, K_{Sall} — значение коэффициента функциональной безопасности многопараметрического процесса и УО по всем диагностируемым параметрам в целом.

Коэффициент K_{Sall} — это число, которое характеризует уровень функциональной безопасности по всем диагностируемым параметрам технологического процесса и УО в целом в каждый данный момент времени.

Если значение диагностируемого параметра находится в зоне допустимых отклонений, то информация сжимается от данных о полном значении отсчета до данных о величине отклонения. На многопараметрическом уровне после умножения коэффициентов функциональной безопасности по отдельным параметрам объем информации также уменьшается до одного числа.

Отказ по одним параметрам процесса может привести к катастрофическим последствиям, а по другим — к небольшому ухудшению качества процесса. Важность параметров для общего уровня безопасности учитывается с помощью выбора показателя степени m для функции соответствия каждого параметра. У наиболее важных параметров m должны быть больше единицы, а у параметров меньшей важности — меньше единицы.

Оценка уровня безопасности инерционного процесса

Технологические процессы в УО протекают в течение определенного времени. За это время в цепях контроля могут возникать помехи. Для того чтобы избежать влияния помех, сигнал о выходе параметра за зону допустимых отклонений, т.е. сигнал об отказе должен возникать только после того, как два, три или четыре последовательных отсчета оказываются за пределами допустимого отклонения [5].

Некоторые процессы протекают достаточно длительное время. При этом основной задачей обеспечения безопасности является не диагностирование отказа во время протекания процесса, а принятие решения о профилактическом ремонте УО или перенастройке параметров процесса из-за их общей разбалансировки еще до того, как какой-либо параметр выйдет за пределы зоны допустимых отклонений.

Для оценки уровня безопасности по каждому диагностируемому параметру за заданный временной интервал целесообразно применять текущее среднее суммы значений коэффициентов безопасности для каждого измерения. Текущий средний коэффициент безопасности K_{Sai} рассчитывается по формуле

$$K_{Sai} = (1/i) \cdot \sum_{i=1}^l K_{Si}, \quad (5)$$

где i — номер измерения значения диагностируемого параметра, l — заданное количество измерений (временной интервал), K_{Si} — коэффициент безопасности параметра во время i -го измерения, K_{Sai} — рассчитанный текущий средний коэффициент безопасности во время i -го измерения [6].

Текущий средний коэффициент функциональной безопасности многопараметрического инерционного процесса оценивается как произведение текущих средних коэффициентов для каждого параметра по формуле

$$K_{Saiall} = \prod_{j=1}^k K_{Saij}, \quad (6)$$

где i — номер измерения значения диагностируемого параметра, j — номер диагностируемого параметра, k — количество диагностируемых параметров, K_{Saij} — текущий средний коэффициент безопасности по j -му параметру во время i -го измерения, K_{Saiall} — текущий средний коэффициент функциональной безопасности многопараметрического процесса во время i -го измерения по всем диагностируемым параметрам в целом (6).

Предположим, что диагностируемый параметр x_i измеряется через равные промежутки времени в диапазоне допустимых отклонений от $0,8 \cdot x_{ном}$ до $1,2 \cdot x_{ном}$. Тогда для разных весовых функций, приведенных на рис. 2, текущие средние значения коэффициентов безопасности в каждый момент времени показаны на рис. 4.

Предположим, что технологический процесс характеризуется тремя параметрами, причем для оценки уровня безопасности по первому параметру используется параболическая степенная функция соответствия с $m = 1/8$, по второму параметру — с $m = 1$, а по третьему параметру — с $m = 8$. Тогда на момент получения 17-го отсчета для первого параметра текущий средний коэффициент безопасности будет равен 0,84, для второго — 0,62, а для

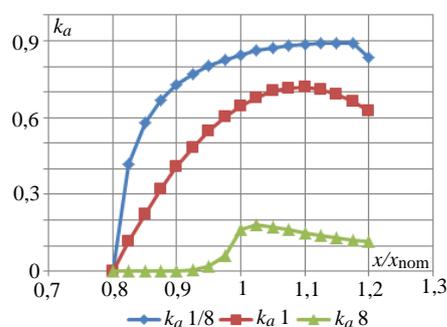


Рис. 4

третього — 0,11. Коэффициент безопасности для всего процесса в целом по диагностируемым параметрам будет равен $K_{Saiall} = 0,057$, т.е. коэффициент безопасности для процесса в целом будет всегда либо равен худшему, либо хуже худшего из коэффициентов безопасности для отдельных параметров.

Заключение

Коэффициент функциональной безопасности технологического процесса и УО по одному диагностируемому параметру оценивается на стадии эксплуатации как инверсия модуля взвешенного отклонения текущей величины параметра от его номинального значения, где весовая функция — функция соответствия норме. Функциональная безопасность инерционного процесса по одному параметру рассчитывается как средняя текущая сумма коэффициентов безопасности каждого отсчета диагностируемого параметра.

Для многопараметрического процесса коэффициент функциональной безопасности равен произведению коэффициентов функциональной безопасности каждого диагностируемого параметра.

Предложенный подход позволяет оценить функциональную безопасность технологического процесса и УО на стадии эксплуатации в каждый данный момент времени или за заданный временной интервал в виде одного числа, причем коэффициент самого высокого уровня безопасности равен единице, при снижении уровня безопасности коэффициент уменьшается, а при отказе коэффициент становится равен нулю.

В.О. Багацький, О.В. Багацький

СТУПІНЬ ВІДПОВІДНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НОРМІ ЯК ПОКАЗНИК ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

Виконано аналіз стандарту з функціональної безпеки. Чисельна оцінка рівня повноти безпеки технологічних процесів і керованого обладнання за відмовами, які не діагностуються і є випадковими, проводиться відповідно до стандарту на стадії їх проектування з використанням імовірнісних методів. Мета роботи — розробка методів чисельної оцінки рівня безпеки технологічного процесу і керованого устаткування на стадії експлуатації за відмовами, які діагностуються в кожен момент часу. Вважається, що рівень функціональної безпеки технологічного процесу і керованого обладнання найвищий, якщо контрольований параметр дорівнює своєму номінальному значенню, і дорівнює нулю при виході контрольованого параметра за гранично припустимі відхилення, тобто при відмові. У даній роботі запропоновано в зоні гранично припустимих відхилень оцінювати (діагностувати) функціональну безпеку технологічного процесу і керованого обладнання за одним параметром як інверсію модуля зваженого відхилення контрольованої величини від її номінального значення. Використовується діапазонне вікно з ваговими ступеневими параболічними функціями. Функціональна безпека інерційного процесу за одним параметром розраховується як середня поточна сума коефіцієнтів безпеки кожного відліку параметра, який діагностується. Для багатопараметричного процесу коефіцієнт функціональної безпеки дорівнює добутку коефіцієнтів функціональної безпеки кожного параметра, який діагностується. Запропонований підхід дозволяє оцінити функціональну безпеку технологічного процесу і керованого обладнання на стадії експлуатації на даний момент часу або за заданий часовий інтервал у вигляді одного числа, причому коефіцієнт найвищого рівня безпеки дорівнює одиниці, при зниженні рівня безпеки коефіцієнт зменшується, а при відмові дорівнює нулю.

Ключові слова: технологічний процес, ступінь відповідності нормі, функціональна безпека, показник функціональної безпеки.

DEGREE OF CONFORMITY OF TECHNOLOGICAL PROCESS TO NORM AS AN INDICATOR OF FUNCTIONAL SAFETY

The analysis of the standard for functional safety was done. The numerical assessment of the level of safety completeness of technological processes and equipment under control (EUC) for non-diagnosed random failures is made in accordance with the standard at the design stage using probabilistic methods. The purpose of the work is the development of numerical evaluation methods at the operational stage of the safety level of the technological process and equipment under control by diagnosed failures at any given time or for a given time interval. It is assumed that the level of functional safety of the process and the equipment under control is the highest when the monitored parameter is equal to its nominal value and is 0 when the monitored parameter leaves the tolerance limits, i.e. on failure. In this work, it is proposed to evaluate (diagnose) the functional safety of the process and the equipment under control in one tolerance zone by one parameter as the inversion of the module of the weighted deviation of the monitored value from its nominal value. A band window with weight power parabolic functions is used. The functional safety of the inertial process for one parameter is calculated as the average current sum of safety factors of each sample of the parameter being diagnosed. For a multiparameter process, the functional safety factor is equal to the product of the functional safety factors of each diagnosed parameter. The proposed approach allows to evaluate the functional safety of the process and the equipment under control at the operation stage at any given time or for a given time interval as a single number, with the coefficient of the highest level of safety equal to 1, when the level of safety decreases, the coefficient decreases while the failure the coefficient is equal to zero.

Keywords: technological process, degree of conformity to norm, functional safety, index of functional safety.

1. Международный стандарт IEC 61508-2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
2. ГОСТ Р МЭК 61508 – 2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 1–7. М.: Стандартинформ, 2014.
3. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. М.: Энергоатомиздат, 1985, 439 с.
4. Марпл.мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
5. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами. Под ред. Т. Харрисона. М.: Мир, 1978. 2. 533 с.
6. Багацький В.О., Багацький О.В. Патент на винахід №119554, Україна, МПК (2019.01) G05B 23/00. Спосіб визначення ступеню відповідності інерційного багатофакторного процесу нормі. Заявники та патентовласники: ІК НАН України, Багацький В.О., Багацький О.В., заявка № а 201609824, заявл. 26.09.2016. Опубл. 10.07.2019., бюл.№13.

Получено 04.06 2019

Статья представлена к публикации чл.-корр. НАН Украины Боюном В.П.