

ФОРМАЛИЗАЦИЯ БАЗОВЫХ ПОНЯТИЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ

Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор М.А. Промтов

Ключевые слова и фразы: аналитическая форма; инцидент; отказ; риск; угроза; теория безопасности; термин.

Аннотация: Предпринята попытка перевода наиболее важных терминов теории безопасности из привычной вербальной формы в аналитическую. Методы формализации заимствованы из теории устойчивости, теории чувствительности, математической статистики. Результатом преобразования являются формулировки, не противоречащие официально признанным, однако, более конструктивные с инженерной точки зрения.

Хорошо известно, что теория безопасности как наука обладает собственным понятийно-терминологическим аппаратом, используемым при описании и решении задач защиты объектов исследования от внутренних и внешних угроз. К базовым терминам относятся, например, такие как «безопасность», «угроза», «риск», «инцидент», «уязвимость» и другие [1]. Некоторые из них пока не получили нужной четкости и конструктивных нотаций, о чем свидетельствуют развернутые дискуссии на эту тему [2, 3].

На примере семантического анализа терминов «безопасность», «промышленная безопасность» и «пожарная безопасность» в работе [4] сделано заключение о необходимости замены вербальных терминологических утверждений на более строгие и однозначные математические выражения, устранив таким способом возможные расхождения мнений пользователей о содержании понятийного аппарата. Попытаемся перевести смысл ряда базовых терминов теории безопасности с вербальной формы на аналитическую.

Для этого рассмотрим в качестве объекта исследования природо-промышленную систему $S_{ППС}$, которая, в зависимости от уровня внутренних и внешних воздействий (опасностей, угроз), может находиться в трех

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@nnn.tstu.ru; Лузгачева Надежда Валерьевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов.

различных состояниях: $S_{\text{ППС}}, i, i = 1, 2, 3$. Каждое такое состояние соответствует одному из трех альтернативных режимов: 1 – нормального функционирования; 2 – развития нештатной ситуации; 3 – реализации аварии. $S_{\text{ППС}, i}$ однозначно характеризуется конечномерным вектором фазовых переменных $\bar{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}]^T$, где T – знак транспонирования. В качестве x_i используются переменные с интенсивными свойствами (не зависящие от размеров системы) – концентрации, давления, энтальпии и т.д.

С учетом различия режимов $S_{\text{ППС}}$ все пространство состояний X может быть представлено в виде суммы субпространств $X_{(1)}, X_{(2)}$ и $X_{(3)}$

$$X = X_{(1)} \cup X_{(2)} \cup X_{(3)}. \quad (1)$$

И поскольку $S_{\text{ППС}}$ является динамической системой, ее переменные зависят от времени t : $x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)$. Тогда, на интересующем интервале времени $[0, T]$ будем рассматривать возникновение нештатной ситуации, в результате которой система, исходно находясь в режиме нормального функционирования, внезапно переходит в предаварийный режим, а при определенном стечении обстоятельств и в аварийный. Для наглядности такой процесс перехода изобразим на рис. 1.

По оси ординат отложим ряд пороговых значений любой переменной состояния $x_i(t)$, а по оси абсцисс – текущее время t . Символами x_i^H, x_i^B обозначим нижнюю и верхнюю границы режима нормального функционирования системы, а $x_i^{\text{КОН}}$ и $x_i^{\text{КОВ}}$ – критически опасную нижнюю и верхнюю границы перехода $S_{\text{ППС}}$ из нештатной ситуации в аварийную.

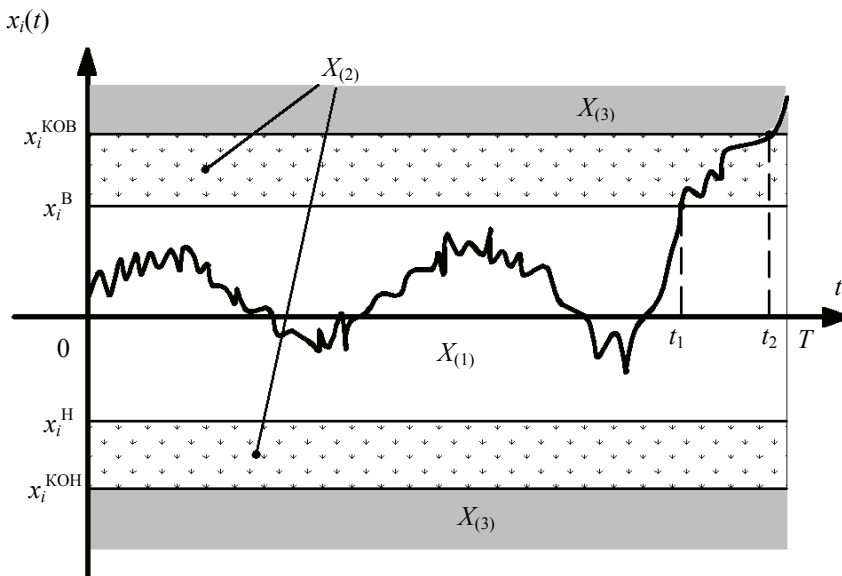


Рис. 1. Отображение пространств состояний $S_{\text{ППС}}$: — — траектория движения системы (на примере реализации $x_i(t)$); $x_i(t) \in X_{(1)}$ – процесс в нормальном режиме; $x_i(t) \in X_{(2)}$ – процесс в предаварийном состоянии; $x_i(t) \in X_{(3)}$ – процесс в аварийном состоянии

Цифры 1 и 2 символизируют нежелательные для системы случайные события:

- событие 1 состоит в том, что при $t > t_1$ $x_i(t) > x_i^B$;
- событие 2 состоит в том, что при $t > t_2$ $x_i(t) > x_i^{KOB}$.

В результате их появления на интервале $\Delta t = t_2 - t_1$ возможна плавная или ступенчатая деградация $S_{ППС}$, отчего снижается эффективность ее функционирования, а при $t > t_2$ происходит окончательное разрушение структуры системы и ее эффективность оказывается равной нулю.

Очевидное сходство рисунка 1 демонстрирует с контрольными картами Шухарта [5, 6], однако, в данном случае рассматривается не проблема качества продукции, а проблема стабильности поведения процессов в условиях действия случайных возмущений.

Для предупреждения появления нежелательных событий 1 и 2 требуются профилактические меры в $S_{ППС}$, способные обеспечить нужную дистанцию между текущими и граничными значениями $x_i(t)$, создавая в системе «барьер» или «запас» по безопасности.

С учетом сказанного сформулируем новое определение термина «безопасность».

Безопасность – свойство самосохранения системы в условиях действия неопределенных по составу и уровню внешних и внутренних опасностей, угроз. Это свойство реализуется на основе комплекса предупредительных и защитных мер, гарантирующих с заданным запасом удаленность равновесных состояний и траекторий движения системы от критически опасных значений.

Слово «самосохранение» здесь надо понимать не в смысле «разумности» системы, а в смысле наделенности ее особыми защитными свойствами, повышающими живучесть $S_{ППС}$ в условиях постоянного влияния внутренних и внешних воздействий. К предупредительным мерам отнесем наличие систем мониторинга и прогнозирования внутренних и внешних угроз; системы диагностики, сигнализации и блокировки опасных состояний; экспертных систем безопасности; автоматических систем безопасности с искусственным интеллектом и др. К типовым защитным мерам – материалы и покрытия, повышающие живучесть системы, а также средства пожаротушения, самоспасения жизни людей и т.п.

В аналитическом виде понятие безопасности формализуем следующим образом

$$\left| x_i^{KOH} - x_i(t) \right| \geq \delta_i; \quad \left| x_i^{KOB} - x_i(t) \right| \geq \delta_i, \quad i = \overline{1, k}, \quad (3)$$

где δ_i – превентивный запас на удаленность $x_i(t)$ от критически опасных нижних x_i^{KOH} и верхних x_i^{KOB} значений.

Если компоненты вектора \bar{x} взаимозависимы, тогда вместо (2) можно использовать метрику вида

$$\sum_{i=1}^k \beta_i \left| x_i^{KOB} - x_i(t) \right| \geq \delta'_i; \quad \sum_{i=1}^k \beta_i \left| x_i^{KOH} - x_i(t) \right| \geq \delta'_i, \quad (4)$$

где $\beta_i > 0$ – заданные вещественные положительные коэффициенты.

В качестве оценки расстояния $||$ в (4) фигурирует «взвешенная» сумма модулей разности критически опасных и текущих значений компонент вектора состояния, а δ'_i означает совокупный запас на безопасное поведение $x_i(t)$, $i = \overline{1, k}$.

Неопределенность в $S_{\text{ППС}}$, связанная с составом и уровнем действующих опасностей, угроз, позволяет дать и вероятностную интерпретацию термина «безопасность»

$$\begin{aligned} \Pr\{|x_i^{\text{КОН}} - M[x_i(t)]| \geq \delta_i\} &\geq 1 - \varepsilon_i; \\ \Pr\{|x_i^{\text{КОВ}} - M[x_i(t)]| \geq \delta_i\} &\geq 1 - \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \Pr – символ вероятности; δ_i – запас на предупреждение сближения математического ожидания $M[\cdot]$ случайной реализации $x_i(t)$ с критически опасными значениями; ε_i – заранее заданное достаточно малое положительное число.

При использовании (5) предполагается эргодичность случайного процесса $x_i(t)$ и возможность вычисления $M[\cdot]$ в темпе с изменением состояний $S_{\text{ППС}}$.

В отношении (3) – (5) отметим, что эти условия совершенно не противоречат определению безопасности, сформулированному в ФЗ «О безопасности» № 2446-1 от 5 марта 1992 г., а использование «коэффициентов запаса» для повышения уровня безопасности объектов, например, хорошо известно в строительстве [7].

Другое важное понятие теории безопасности – понятие «риска» – также нуждается в конкретизации содержания. Это понятие ассоциируется с возможностью появления в системе неполадок, отказов и структурных нарушений, способных привести к утрате стабильности системы, аварии и нежелательным последствиям. Все сформулированные в ряде официальных документов [8–15] определения риска сходны между собой в том, что это «вероятностная мера опасности и ее последствий». Вероятностная по той причине, что мы испытываем недостаток информации о возможном поведении системы и последствиях нежелательных событий.

Известно много возможных причин [16], по которым происходит технологическая авария, однако, все причины, вызвавшие ее, в конечном счете отражаются на значениях переменных состояния системы $x_i(t)$. Это обстоятельство дает право при формулировке термина «риск» говорить не о первичных аварийных опасностях вообще, а о совершенно конкретных вторичных событиях типа 1 и 2, упомянутых выше.

Отсюда определение риска дадим в следующей интерпретации. **Риск** – вероятностная мера событий $x_i(t) > x_i^{\text{КОВ}}$, $i = \overline{1, k}$, наступление которых порождает аварию с ожидаемыми потерями (ущербами). Формализуем понятие риска как среднее значение функции потерь, используемое в математической статистике [17]. Символом R обозначим значение риска, а L_j – множество всех элементарных сочетаний неблагоприятных событий, $j = \overline{1, l}$, составленных на основе условий $x_i(t) > x_i^{\text{КОВ}}$, $i = \overline{1, k}$. И пусть каждому сочетанию неблагоприятных событий L_j можно приписать вероятность $p_j(L_j)$ и потери от его реализации Y_j , $0 \leq p_j(L_j) \leq 1$.

Тогда величина риска R , рассчитанная по формуле

$$R = \sum_{j=1}^l Y_j P_j(L_j) \quad (6)$$

представляет собой среднюю (ожидаемую) величину потерь $S_{\text{ППС}}$ в аварийной ситуации.

В отличие от известных определений риска, в которых тип неблагоприятных событий не конкретизирован, новое определение способствует лучшему пониманию ситуации с возникновением аварии и ее последствиями.

Обоснованную полемику вызывает у специалистов и равноценное использование в теории безопасности таких терминов, как «угроза» и «опасность». В словаре С.И. Ожегова [18] они, к сожалению, слабо дифференцированы: слово «угроза» рассматривается как возможная опасность, а само слово «опасность» определено лишь как источник несчастий. В Оксфордском словаре А.С. Хорнби [19], в слове «угроза» видится смысл знака или предупреждения о грядущем беспокойстве, тогда как «опасность» определяется «де-факто» – в виде ущерба здоровью или потери человеческой жизни. Надо признать сходство трактовки слова «угроза» как потенциальной опасности состоянию объекта, а вот слово «опасность» желательно воспринимать по Хорнби – в качестве реализации нежелательных ожиданий или приведения угрозы в действие.

При математической формализации этих терминов воспользуемся известными положениями теории чувствительности [20]. Пусть объект исследования описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x} = f(x, p(t), t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (7)$$

где x – k -мерный вектор переменных состояния; $p(t)$ – m -мерный вектор параметров с номинальным значением $p = p_0$; f – вектор-функция; t – время.

Поскольку p зависит от времени, входные воздействия оказываются известными функциями и их также можно считать параметрами. В число параметров входят: начальные условия; коэффициенты, зависящие и не зависящие от времени; параметры, изменяющие порядок системы и др.

Пусть функция f допускает разложение в ряд Тейлора в окрестности точки $p = p_0$

$$x(t, p) = x(t, p_0) + \frac{\partial x(t, p)}{\partial p} \Big|_{p=p_0} (p - p_0) + \dots \quad (8)$$

Вектор $\frac{\partial x(t, p)}{\partial p} \Big|_{p=p_0}$ является вектором чувствительности вектора состояния x относительно p с k -м числом компонент. Обозначим его символом

$$s(t) = \frac{\partial x(t, p)}{\partial p} \Big|_{p=p_0}.$$

Если в качестве параметров p рассматривать внешние $\bar{\xi}$ и внутренние $\bar{\varepsilon}$ воздействия на $S_{\text{ППС}}$, тогда понятие «внешней и внутренней угрозы» формализуем следующим образом

$$\exists \xi_i \in \Xi \text{ такие, что } \left. \frac{\partial x(t, \xi_i)}{\partial \xi_i} \right|_{\xi_i = \xi_{i0}} > 0, \quad i = \overline{1, l} \quad (9)$$

и

$$\exists \varepsilon_j \in E \text{ такие, что } \left. \frac{\partial x(t, \varepsilon_j)}{\partial \varepsilon_j} \right|_{\varepsilon_j = \varepsilon_{j0}} > 0, \quad j = \overline{1, r}. \quad (10)$$

Записи (9) и (10) означают, что существуют такие воздействия ξ_i и ε_j , к которым оказываются чувствительны переменные состояния $S_{\text{ППС}}$. Их следует рассматривать как **потенциально опасные**.

В [20] показано, что $s(t)$ удовлетворяет векторному дифференциальному уравнению

$$\dot{s} = \left[\frac{\partial f(x, p_0, t)}{\partial x} \right]_{x=\bar{x}} s + \left. \frac{\partial f(\bar{x}, p, t)}{\partial p} \right|_{p=p_0}, \quad (11)$$

где $\bar{x} = x(t, p_0)$ и

$$s(0) = \left. \frac{\partial x_0}{\partial p} \right|_{p=p_0}. \quad (12)$$

Решение уравнения (11) позволяет рассчитать изменение коэффициентов чувствительности во времени, а значит оценить реальность превращения «угрозы» в «опасность».

Рассмотрим теперь ситуацию с накоплением опасностей в системе. Пусть ε – некоторая переменная, представляющая «внутреннюю опасность» для $S_{\text{ППС}}$. Введем функцию $J(x_i(\varepsilon, t))$, отражающую через x_i накопление повреждений (усталости) в системе в момент времени t

$$J(x_i(\varepsilon, t)) = \int_{t_0}^t x_i(\varepsilon, \tau) d\tau. \quad (13)$$

Очевидно, что при $t_{i+1} > t_i$ имеем

$$J(x_i(\varepsilon, t_{i+1})) > J(x_i(\varepsilon, t_i)), \quad (14)$$

и если высказывание

$$(x_i(t_{i+1}) > x_i(t_i)) \wedge (x(t_{i+1}) > x^B) \quad (15)$$

истинно, тогда с момента t_{i+1} в $S_{\text{ППС}}$ наблюдается плавная деградация из-за накопления в ней структурных изменений (например, изменения коэффициентов или связей).

В практическом плане представляет интерес определение «опасных» сочетаний внешних ξ_i и внутренних ε_j воздействий, вызывающих аварию. Их можно обозначить через множество $\Pi \subset \Xi \times E$ упорядоченных последовательностей значений ξ_i и ε_j , найденных в ходе проведения имитационных экспериментов с моделью $S_{\text{ППС}}$.

Помимо случаев плавной или постепенной деградации системы возможны также и ступенчатые изменения ее состояний, вызванные внезапным отказом элементов. Под **внезапным отказом элемента** будем понимать полную утрату его рабочей функции в произвольный момент времени.

С помощью $f(t)$ обозначим рабочую функцию элемента $S_{\text{ППС}}$ (рис. 2, а). В штатном режиме работы на выходе элемента действует сигнал $x(t) \equiv f(t)$. В результате отказа $x(t) = 0$. При формализации понятия внезапного отказа воспользуемся единичной функцией Хевисайда $1(t)$, а работу элемента с момента времени $t = t_0$ до утраты его рабочей функции при $t = (t_0 + T_k)$ покажем на рис. 2, б. Тогда в соответствии с таким представлением об отказе элемента, получаем математическую формализацию вида

$$x(t) = f(t)[1(t - t_0) - 1(t - t_0 - T_k)], \quad (16)$$

где T_k – критический момент времени.

Не менее важным понятием, требующим формализации, является и понятие «инцидент». Некоторые специалисты склонны рассматривать его в качестве «активатора» аварии или первопричины ее возникновения. Между тем словарь [21] дает трактовку инцидента как «происшествие», акцентируя внимание на процессе изменений. Воспользуемся этим предположением и сформулируем понятие «инцидент» в следующей форме.

Инцидент – любое структурное или параметрическое изменение системы, связанное с отказами ее элементов, сопровождаемое термодинамически необратимым процессом перехода $S_{\text{ППС}}$ из состояния нормального функционирования в аварийное.

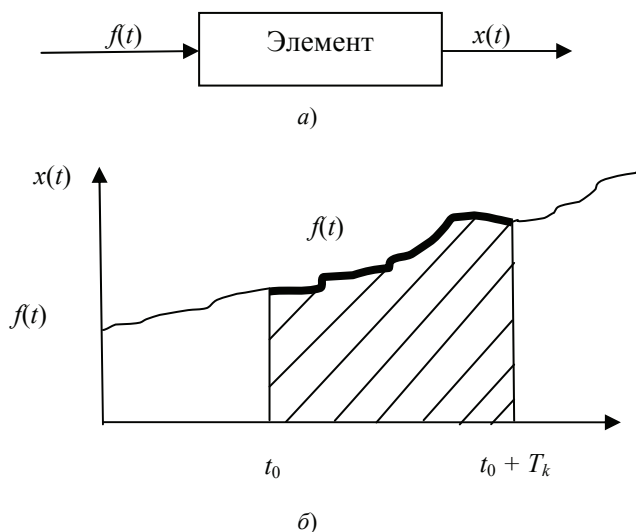


Рис. 2. Формализация понятия внезапного отказа:
а – схема элемента $S_{\text{ППС}}$; б – функция работы элемента $S_{\text{ППС}}$

Из этого определения следует отображение процесса изменения состояний $S_{\text{ППС}}$

$$S_{\text{ППС}}(\alpha^H, \beta^H) \rightarrow S_{\text{ППС}}(\alpha^*, \beta^*) \rightarrow S_{\text{ППС}}(\alpha^A, \beta^A) \quad (11)$$

где (α^H, β^H) , (α^*, β^*) и (α^A, β^A) – значения параметрических и структурных компонент системы в трех состояниях: нормального функционирования; реализации отказов; аварии.

В заключение отметим, что предложенные новые формулировки терминов не противоречат официально принятым, однако, интерпретируют содержание с помощью конкретных переменных и тем самым нацеливают исследователя на поиск нужной информации, делая понятийный аппарат теории безопасности более конструктивным.

Список литературы

1. Анализ риска и проблем безопасности : в 4 ч. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности / науч. рук. К.В. Фролов. – М. : Знание, 2006. – 640 с.
2. Девисилов, В.А. Понятийно-терминологический аппарат в области безопасности / В.А. Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 4. – С. 3.
3. Русак, О.Н. Давно пора / О.Н. Русак // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 5. – С. 64.
4. Попов, Н.С. О некоторых результатах семантического анализа терминов теории безопасности / Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, В.А. Лузгачев // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И.Вернадского. – 2010. – № 4–6(29). – С. 30–38.
5. Хансен, В.Л. Контроль качества. Теория и применение / В.Л. Хансен. – М. : Прогресс, 1968. – 519 с.
6. Коуден, Д. Статистические методы контроля качества : пер. с англ. / Д. Коуден ; под ред. Б.Р. Левина. – М. : Физматгиз, 1961. – 623 с.
7. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учеб. пособие в 5-ти книгах. Кн. 5 / Под ред. В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М. : АСВ, 2001. – 416 с.
8. ГОСТ ИСО/ТО 12100-1-2001. Безопасность оборудования. Основные понятия. Общие принципы конструирования [Электронный ресурс]. – Введ. 2003-07-01. – Режим доступа: <http://www.fireman.ru/bd/gost/12-1-033/12-1-033.html>. – Загл. с экрана.
9. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 30. – Ст. 3579.
10. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (с изменениями на 27 декабря 2009 года) // Рос. газ. – 1999. – 29 декабря.
11. ГОСТ Р 22.0.02-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. – Введ. 1996-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1995.

12. ГОСТ 12.1.033–81. Пожарная безопасность. Термины и определения. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 августа 1981 г. № 4084 срок действия установлен с 01.07.82 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fireman.ru/bd/gost/12-1-033/12-1-033.html>. – Загл. с экрана.
 13. ГОСТ Р 22.0.05–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Введ. 1996–01–01. – Режим доступа: <http://www.fireman.ru/bd/gost/22-0-05/22-0-05-94.htm>. – Загл. с экрана.
 14. СП 11-107–98. Порядок разработки и состав раздела «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций» проектов строительства [Электронный ресурс]. – Введ. 1998–01–07.– Режим доступа: [http://www.snip-info.ru/Sp_11-107-98_\(2000\).htm](http://www.snip-info.ru/Sp_11-107-98_(2000).htm). – Загл. с экрана.
 15. Козлитин, А.М. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов. – Саратов : Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 2000. – 216 с.
 16. Алымов, В.Т. Анализ техногенного риска / В.Т. Алымов, В.П. Крапчатов, Н.П. Тарасова. – М. : Круглый год, 2000. – 160 с.
 17. Уилкс, С. Математическая статистика : пер. с англ. / С. Уилкс ; под ред. Ю.В. Линника. – М. : Наука, 1967. – 632 с.
 18. Ожегов, С.И. Словарь русского языка / С.И. Ожегов. – М. : Рус. яз., 1990. – 921 с.
 19. Хорнби, А.С. Учебный словарь современного английского языка / А.С. Хорнби. – М. : Просвещение, 1984. – 770 с.
 20. Томович, Р. Общая теория чувствительности / Р. Томович, М. Вукобратович. – М. : Сов. радио, 1972. – 240 с.
 21. Словарь иностранных слов и выражений. – М. : КРПА «Олимп» ; АСТ, 2002. – 778 с.
-

Formalization of Basic Notions of Security Theory

N.S. Popov, N.V. Luzgacheva

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: analytical form; incident; failure; risk; threat; theory of security; term.

Abstract: An attempt to transfer the most important terms of the theory of security from the habitual verbal form to the analytical one is made. The formalization techniques are borrowed from the theory of stability, sensitivity theory, and mathematical statistics. The result of the transformation is the definitions that do not conflict with the officially recognized ones, but are more practical from the engineering point of view.

© Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, 2010