

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНТРОПИЙНОЙ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ

В.С. Деева, С.А. Романишина*, С.М. Слободян

Томский политехнический университет

*Житомирский национальный агроэкологический университет, Украина

E-mail: sms_46@ngs.ru

Установлена связь оценки изменения надёжности отдельных элементов и самой системы или устройства с энтропией как мерой оценки неопределенности состояния систем, вызванного рядом случайных эксплуатационных нарушений их функционирования в процессе практического применения. В предположении справедливости показательного (экспоненциального) закона распределения вероятности времени безотказной работы системы найдено, что диапазон количественных значений энтропийной оценки для различных типов элементов, узлов, устройств лежит в определённом диапазоне интервала изменений уровня энтропийного показателя, подобного хаотическому показателю Херста.

Ключевые слова:

Энтропия, оценка, живучесть, хаос, показатель Херста, система.

Key words:

Entropy, estimation, vitality, chaos, Hurst coefficient, system.

Введение

В настоящее время в практике большинства отраслей экономик многих стран, физический эксперимент и производство не являются исключением, наблюдаются две сильные тенденции. Первая – постоянный рост цен на энергоносители. Вторая – постоянный рост энерговооружённости любого технического, в том числе и экспериментального, оборудования и т. п., усиление степени комплексирования элементов автоматизации, компьютериза-

ции и специализации по направлениям практического применения. Обе тенденции существуют на фоне возрастающих требований к повышению экономичности технологических процессов, применения энергосберегающих технологий и производств, усиления мер по снижению энергетических потерь.

Первая тенденция, обусловленная ростом расходов на энергоносители, приводит к необходимости исключения даже малозначимых сбоев и ава-

рийных ситуаций в работе техники, приводящих к загрязнению окружающей среды. Вторая тенденция усиливает внимание к функциональной надёжности оборудования, ставя задачу обеспечения надёжности по рейтингу проблем в группу первоочередных. Приоритет внимания к проблеме надёжности оборудования существует на всех этапах его жизненного пути (проектирования, изготовления и эксплуатации). Поэтому решение этих задач является целым комплексом экономических, экологических и научно-технических проблем.

Как показывает анализ литературных источников, проблема энергосбережения решается на уровне отдельных задач, таких как экономия энергоресурсов, проведение диагностики энергетического и другого оборудования. Важной задачей также является сокращение трудоёмкости технического обслуживания любых технических средств, функционирующих часто, если пользоваться понятием термодинамики, как открытые системы, которые находятся в состоянии непрерывного взаимодействия и взаимного обмена (энергией, веществом, информацией) с окружающей средой, в том числе и социальной.

В таких случаях наилучшим подходом и, наверное, наиболее качественным для получения всеобщей меры оценки неопределённости, беспорядка, хаоса и неорганизованности подобного рода вероятностных систем и средств любой природы будет являться вероятностный [1–10], в том числе и энтропийный, подход, рассматриваемый в настоящей работе в приложении к оценке живучести устройств и систем.

Получение рационального результата связано с решением теоретических, методологических и практических задач обеспечения функциональной надёжности оборудования, учитывая тот факт, что как на стадии проектирования, так и на стадиях последующего применения любого оборудования на практике всегда присутствует элемент неопределённости в принятии конкретных решений, конкретных областей и условий эксплуатации. При этом основной упор в направлении решений подобных задач должен быть сделан на определение оптимального, экономически оправданного, достижимого уровня надёжности с учётом обеспечения безопасности эксплуатации рассматриваемых средств, а также на оказание большего внимания разработке вероятностных методов расчётов, основанных на использовании статистического и экспериментального материала, для нахождения оптимальных решений на стадиях проектирования, изготовления и технической эксплуатации этих средств.

Несмотря на значительное число работ по изучению надёжности, проведение исследований применительно к оборудованию физического эксперимента и техники с учётом её мобильности и подвижности по-прежнему является актуальным и имеет существенную и практическую значимость. Это объясняется весьма значительными мате-

риальными затратами при её отказах, приводящих к снижению экономической эффективности средств и физических установок в целом.

Основные положения оценки вероятностных свойств

Для оценки живучести любого оборудования как технического средства, согласно основам теории вероятности [2, 3], можно записать:

$$P_z = \prod_i P_i \left\{ \begin{array}{l} \leq 1 \\ \geq 0 \end{array} \right\},$$

где P_i — уровни запаса надёжности на соответствующих этапах жизни оборудования (проектной, технологической, эксплуатационной). В идеальном случае, уровень надёжности $P_z \approx 1$; в реальной практике $P_{пр} > P_{тех} > P_{эк}$ и в результате $P_z < 1$ (т. е. на всех последующих стадиях жизни техники уровень надёжности по сравнению с теоретически заложенной в проекте будет ниже). Это практически подтверждает факт неизбежного снижения ресурса запаса надёжности на всех последующих стадиях жизни.

Анализ многочисленных публикаций и статистических исследований [1–4] говорит о том, что снижение ресурса надёжности оборудования является следствием влияния естественных процессов изнашивания, эрозии, коррозионных и других процессов с электрохимическими и термическими явлениями, приводящих к постепенным и внезапным отказам элементов. Данные широко известных статистических исследований говорят о том, что для одиночных, мелких серий и крупносерийного оборудования все отказы делятся на две устойчивые группы классификации по причинам отказов: ~30 % отказов вызваны эксплуатационными причинами, ~70 % — конструкционными и производственными дефектами.

Для того чтобы связать оценку изменения надёжности отдельных элементов и самой системы или устройства с мерой неопределённости их состояния, вызванной рядом случайных нарушений их функционирования в процессе практической эксплуатации, кратко рассмотрим понятие энтропии как меры оценки неопределённости состояния систем, вызванной такими нарушениями.

В настоящее время наибольшее распространение [4–10] при исследовании любого типа систем как меры неопределённости их состояния получило понятие энтропии, впервые введённое в 1865 году немецким физиком (основателем термодинамики и молекулярно-кинетической теории теплоты) Клаузиусом Рудольфом Юлиусом Эмануэлем. Величина энтропии как меры является оценкой фундаментальных свойств любых систем, которым, в большей или меньшей мере, присуще неопределённое, неоднозначное, с точки зрения детерминированного описания, вероятностное, т. е. не всегда выполняющееся поведение наблюдаемой системы.

Так, например, в статистической физике понятие энтропии трактуется как измеримая мера веро-

ятности возможного пребывания наблюдаемой или исследуемой системы в данном состоянии. Взаимосвязь проста. Чем больше беспорядок, тем больше энтропия. Но, как в любой энергетически ограниченной системе, траектории состояния любой системы с течением времени приходят к своему наиболее вероятному положению, отражающему наиболее устойчивое состояние системы. Если в системе, находящейся в этом, кажущемся устойчивым, состоянии возрастает беспорядок, увеличивается хаотичность траектории смены состояний, и это означает – растёт энтропия.

Изменение устойчивого состояния системы не является чем-то особенным, более того, нормальным являются непрерывные вариации состояния систем. Это обусловлено тем, что в любых открытых системах в процессе их существования непрерывно идёт обмен (энергией, информацией, веществом и т. д.) с внешней, окружающей их, средой. При взаимодействии систем (внешняя среда тоже является открытой системой) по причине взаимного обмена значение энтропии систем может не только расти, но и уменьшаться.

Другими словами, значение энтропии любой открытой системы есть функция. Причём она является аддитивной функцией слагаемых порядка и беспорядка. Одно из слагаемых, увеличивающих порядок, представляет собой изменение энтропии, обуславливаемое необратимыми процессами, протекающими внутри самой системы. Второе слагаемое, увеличивающее порядок, – изменение энтропии, обуславливаемое обратимыми процессами обмена системы веществом, энергией и информацией во внешней, окружающей систему, среде.

Модель оценки вероятностных свойств

Распределение времени безотказной работы какого-либо элемента или устройства технической системы, чаще всего [1–4, 10], подчиняется показательному закону распределения вероятности, точнее экспоненциальному закону вероятности распределения событий. Основным параметром – характеристикой экспоненциального распределения – служит параметр λ , который называют плотностью, или интенсивностью, потока однородных событий с произвольным началом отсчёта момента текущего времени. Экспоненциальному распределению подчиняется, например, величина интервала времени между двумя смежными событиями простейшего потока. Вместе с λ для оценки распределения часто применяют параметр Δ , – среднее время между моментами наступления двух смежных событий. Их взаимозависимость проста:

$$\Delta = \lambda^{-1}.$$

Математическое ожидание и дисперсия экспоненциального распределения:

$$\begin{aligned} \hat{t} &= \Delta = \lambda^{-1}; \\ D &= \sigma^2 = \Delta^2 = \lambda^{-2}. \end{aligned}$$

Его плотность распределения вероятности:

$$f(\Delta, \lambda) = \{0 \text{ при } t \leq 0; \lambda e^{-\lambda t} = \Delta^{-1} e^{-t/\Delta}, \text{ при } t > 0\}$$

характеристики потока отказов. Поэтому её часто называют частотой отказов.

Функция распределения

$$\begin{aligned} F(\Delta, \lambda) &= \\ &= \{0 \text{ при } t \leq 0; 1 - \lambda e^{-\lambda t} = 1 - \Delta^{-1} e^{-t/\Delta}, \text{ при } t > 0\} \end{aligned}$$

отражает вероятность того, что очередное событие – сбой или отказ – наступит в интервале времени $[0, t]$.

Отсюда вероятность отсутствия событий сбоя или отказа (т. е. вероятность безотказной работы) в том же временном интервале $[0, t]$:

$$\begin{aligned} P &= \lambda e^{-\lambda t} = \Delta^{-1} e^{-t/\Delta}, \text{ или,} \\ \text{при } t &= \Delta, P = e^{-t/\Delta} \Big|_{t=\Delta} = e^{-1} = 0,3679. \end{aligned}$$

Другими словами, вероятность безотказной работы не зависит от того, сколько времени работало устройство до момента его использования в данный момент. Это свойство случайной величины, подчиняющейся экспоненциальному распределению (составной части законов распределения марковских случайных процессов), обусловлено отсутствием последствия в простейших потоках событий.

Аналогичным образом можно определить математическое ожидание и дисперсию числа x – применений элемента многократного действия. Вероятность его отказа при j -м использовании в предположении, что $(j-1)$ -й раз он применялся успешно, равна:

$$p_j = (j - \alpha) / j, \text{ где } 0 < \alpha \leq 1.$$

Вероятность того, что элемент будет применён ровно k раз, составит:

$$P[x = k] = \prod_{j=1}^k (1 - p_j) p_{k+1} = \alpha^k (k + 1 - \alpha) / (k + 1) k!$$

Используя методику производящих функций [2, 3], можно найти основные характеристики случайного процесса, отражающего изменения закономерности значения надёжности – вероятностной меры живучести: математическое ожидание

$$M[x] = \dot{\gamma}(1) = e^\alpha - 1$$

и дисперсию

$$D[x] = e^\alpha (2\alpha + 1) - e^{2\alpha}.$$

Закономерность изменения надёжности на интервале текущей эксплуатации $[0; t]$ обычно представляют показательной функцией вида

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right],$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы элемента; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

Тогда функция ресурса живучести на интервале Δ , примет вид

$$R_s = \int_0^{\Delta_s} \lambda(t) dt.$$

Другими словами, с увеличением Δ_s – продолжительности жизни элемента – функция ресурса R_s растёт и ко времени завершения жизни элемента принимает некоторое значение $R_s \rightarrow \max \leq \alpha_{\max}$.

Если принять во внимание трактовки информационного и термодинамического понятий энтропии H , то функцию ресурса живучести R_s в относительной мере измерения можно принять в качестве энтропийной R_H – меры отражения состояния ресурса оборудования, а также меры соответствия вероятности снижения ресурса или запаса живучести. Тогда можно записать соотношение физической тождественности этих понятий:

$$R_s \equiv R_H = \{\leq 1; \geq 0\}.$$

Это соотношение отражает реальную сущность состояния любого элемента или комплекса элементов любой техники: Максимум величины энтропийной меры ресурса живучести достигается к моменту времени его катастрофы (разрушения, деградации), т. е. времени выработки элементом своего ресурса жизни (эксплуатации, старения), значение которого устанавливается на стадии его проектирования, являющейся стадией начала жизни.

Другими словами, энтропийная мера ресурса живучести как любая обобщённая вероятностная мера какого-либо устройства будет являться результирующей мерой живучести симбиоза элементов и узлов, составляющих это устройство. В конечном счёте, можно утверждать и энтропийную меру живучести самого устройства и самой системы.

На начальном этапе эксплуатации элемент обладает наибольшим ресурсом живучести. Степень надёжности его высока, потому мера стохастичности – энтропия – минимальна или близка к нулевому уровню. Затем по мере его использования в работе (эксплуатации) ресурс надёжности как меры живучести понижается, при этом вполне естественно уровень энтропии повышается в обратной пропорции к понижению степени надёжности. В конечном итоге, к моменту завершения гарантированного эксплуатационного периода (срока службы) надёжность элемента снижается до минимального уровня, что обуславливает резкое снижение вероятности безотказной работы до предельно минимальных значений.

Таким образом, мера стохастичности состояния элемента – энтропия – при этом стремится к максимально возможному значению, отражающему завершение эксплуатационного цикла жизни элемента, т. е.

$$H_{s,\min} \leq H \leq H_{s,\max}.$$

Или, если принять за основу производную, то получим соотношение:

$$dH / dt = \alpha_H \lambda(t).$$

Если считать, что α_H – нормирующий безразмерный коэффициент, то тогда параметр – интенсивность потока изменения свойств наблюдаемого объекта – $\lambda(t)$ будет являться функциональной мерой изменения значения энтропии, отражающей скорость потери живучести элемента.

При этом $\lambda(t)$ – показатель надёжности функционирования элемента, предельное значение которого

$$\lambda(t) \leq \lambda_{\text{пр}} \quad (t \in [0; T])$$

есть не что иное, как предельно допустимая интенсивность отказов этого класса элементов, а ΔT – срок функционирования элемента (гарантированное время T_x его жизни).

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ при эксплуатации оборудования обычно определяется через параметры потока отказов, полученные на основе статистической информации фактической работы оборудования. Типичное распределение на временном интервале фактической эксплуатации оборудования (от разработки до завершения эксплуатации) плотности вероятности потока (интенсивности потока) отказов приведено на рисунке. Условно весь период «жизни» любого оборудования можно разделить на следующие временные интервалы: период разработки, приработки и доводки до серийного производства – $(t_0...t_1)$; период производства и складирования – $(t_2...t_3)$; период практической эксплуатации – $(t_4...t_5)$; период возрастания потока отказов – $(t_6...t_6)$ и период жизни, когда дальнейшая эксплуатация оборудования нецелесообразна, поскольку может приводить к «катастрофе» – полному отказу.

Для простейшего пуассоновского потока отказов интенсивность потока $\lambda(t) = \lambda_0(t)$ является параметром этого потока и интегральной мерой потока изменения свойств оборудования как объекта наблюдения на интервале его жизни

$$R_s = \int_0^{\Delta T} \lambda_0(t) dt.$$

Решение этого интеграла осуществляется привлечением методов численного интегрирования (например, по формуле трапеций или Симпсона) или упрощёнными методами – путём аппроксимации функции при сложном задании функционала или табличным заданием функции по имеющимся данным об эксплуатации оборудования.

Таким образом, результаты реальной эксплуатации, являющиеся ничем иным, как данными статистического эксперимента живучести оборудования, позволяют определить функцию под интегралом, служащую основой отображения параметра потока $\lambda_0(t)$ – зависимости изменения отказоустойчивого поведения оборудования.

Наиболее полным интегральным отражением закономерности поведения энтропийной (энергетической) характеристики живучести в принятой системе вероятностных координат может служить

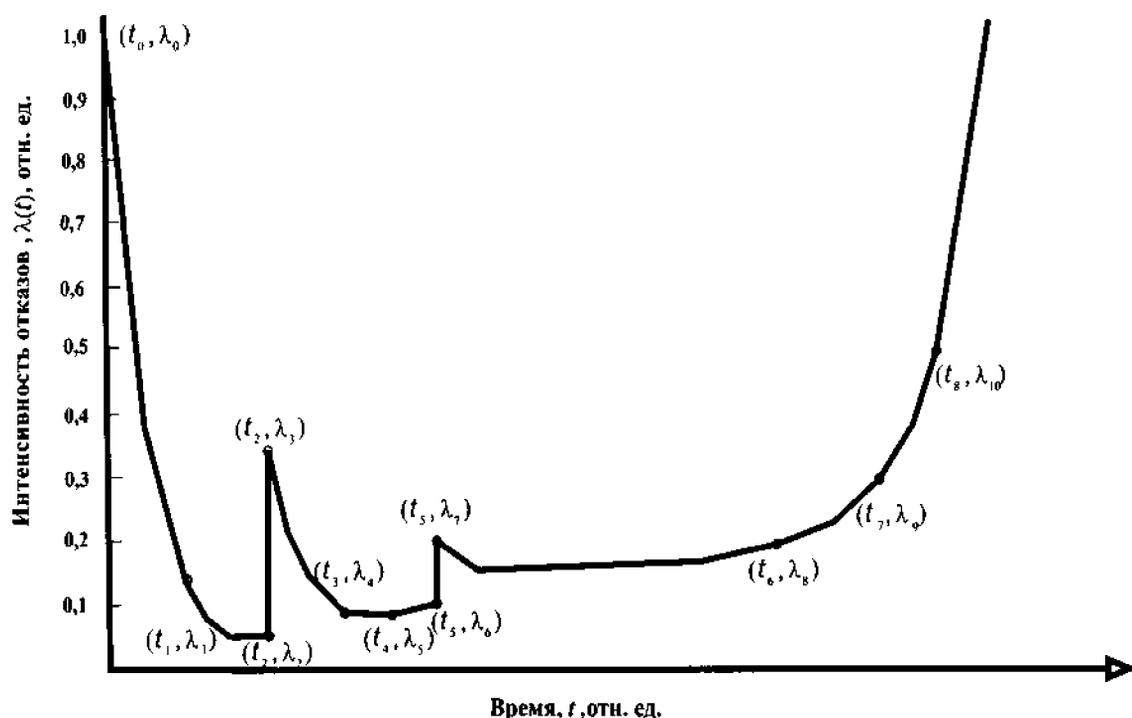


Рисунок. Типичное распределение плотности вероятности потока (интенсивности потока) отказов на интервале фактической эксплуатации оборудования (от разработки до завершения эксплуатации)

площадь, ограничиваемая кривой распределения вероятности безотказной работы, которую можно обозначить через $P_s(t)$.

В идеальной (безотказной) работе оборудования вероятность безотказной работы равна единице (как максимально возможному значению относительной живучести) на всём интервале времени жизни T_x оборудования. В условиях реальной эксплуатации закон распределения плотности вероятности безотказной работы в большей степени соответствует показательному закону распределения. Поведение вероятности безотказной работы является наглядной иллюстрацией того, как широко могут изменяться характеристики типового оборудования или отдельного элемента системы в любой момент времени из-за наличия технологических производственных погрешностей и в течение всего срока эксплуатации ввиду постепенного износа. Поведение кривой распределения $P(t)$ в начале жизни (эксплуатации) является ярким отражением влияния производственных погрешностей конструктивных особенностей системы, оборудования или его элементов. Тренд постепенного износа показывает постепенное ухудшение номинальных характеристик в течение времени жизни элемента.

На ряде примеров, в том числе и с привлечением известных результатов исследований других авторов [4–10], апробации подхода формирования энтропийной оценки потенциальных возможностей техники найден диапазон количественных значений энтропийной оценки. Величина кон-

кретного значения энтропийного показателя живучести, тождественного по смыслу хаотическому показателю Херста, является, хотя и в слабой взаимосвязи, функцией особенностей условий эксплуатации [11].

Конструктивные и технологические погрешности в каждый конкретный момент времени распределены с определённой плотностью вероятности относительно номинальных значений параметров и отражают особенности характера изменения их как статистических характеристик на интервале времени жизни элемента.

Заключение

Учитывая проведенный численный анализ и обобщение обширных теоретических и экспериментальных данных, опубликованных в работах разных авторов, по исследованию надёжности широкого спектра отдельных элементов и комплексов оборудования, можно сделать следующее заключение.

Путем практического применения (апробации) представленного подхода формирования энтропийной оценки потенциальных возможностей техники, найдено, что диапазон количественных значений энтропийной оценки для различных типов элементов, узлов, устройств лежит в диапазоне интервала изменений уровня энтропийного показателя, подобного хаотическому показателю Херста, примерно равного по величине значениям, лежащим в интервале изменений: $0,1 \leq k_s \leq 0,3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 487 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Академия, 2005. – 576 с.
3. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копёнкин Ю.Н., Коровина И.А. Справочник по вероятностным расчётам. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.
4. Бологин В.В. Прогнозирование ресурса машин конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
5. Башуров Б.П. Пути совершенствования технической эксплуатации вспомогательного оборудования энергетических установок судовых транспортных средств. – Новороссийск: НГМА, 2002. – 269 с.
6. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
7. Петров В.В., Соболев В.И. Энтропийный подход к оценке качества систем автоматического регулирования // Доклады РАН. – 1996. – Т. 387. – № 4. – С. 799–801.
8. Берже П., Помо М., Видаль К. Порядок в хаосе. – М.: Мир, 1991. – 160 с.
9. Шустер Г. Детерминированный хаос / пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 242 с.
10. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: РХД, 2001. – 528 с.
11. Деева В.С., Романишина С.А. Устойчивость энтропийной живучести систем // Молодёжь и наука: Матер. VIII Всеросс. научно-техн. конф., посвящённой 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. – Красноярск, 19–27 апреля 2012. – Красноярск: Сибирский федеральный университет (СФУ), 2012. – С. 120–123.

Поступила 27.03.2012 г.